THE UNIVERSITY
OF ILLINOIS
LIBRARY

535
B66v

VISION

ET

REPRODUCTION

DES FORMES ET DES COULEURS

COULOMMIERS
Imprimerie Paul BRODARD.

BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE
de l'INGÉNIEUR et du PHYSICIEN

Beaucoup de Science,
mais en vue des Applications.

VISION
ET
REPRODUCTION
DES FORMES ET DES COULEURS

Vision mono et binoculaire. Illusions d'Optique. Photométrie
Théorie des Couleurs. Photographie. Procédés d'Impression

PAR

H. BOUASSE

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE

PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE
15, RUE SOUFFLOT, 15

NOTE DE L'ÉDITEUR

*Le présent volume forme l'un des quatre ouvrages que l'auteur doit consacrer à l'Optique et aux Sciences connexes. Un autre traitera de l'*Optique géométrique, *un autre de la* Construction, *de la* Description *et de l'*Emploi des Appareils de Mesures et d'Observation; *un quatrième, en collaboration avec M. l'abbé Carrière, sera consacré aux* Interférences et Diffraction.

Les thèses scientifiques et la méthode pédagogique qui font l'originalité de ce Cours sont exposées, tant dans la Préface que dans le corps du volume, avec une précision et une vigueur dont la vivacité de forme et l'énergie d'affirmation peuvent heurter certains points de vue et certains modes d'enseigner habituellement admis. Mais il doit être compris dès le principe que ces discussions et ces critiques, à l'égard desquelles l'éditeur ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

Copyright by Librairie Delagrave, 1917.

535
B66v

L'INORGANISATION DU TRAVAIL SCIENTIFIQUE EN FRANCE

C'est entendu : les Français ne cessent de se débiner pour la grande joie de leurs ennemis. Par exemple ils déclarent manquer d'esprit, que leur cuisine est mauvaise et leur climat détestable !

Mais si quelqu'un s'indigne de ce qu'ils vivent dans le désordre économique, l'anarchie ou l'incohérence, à moins que ce ne soit une boutade de M. Clemenceau, ils se voilent pudiquement la face. Ce n'est pas le moment de nous critiquer, disent-ils ; on fait tort à une thèse défendable en la présentant si brutalement ; il est d'un mauvais patriote d'étaler les plaies nationales ; les choses ayant toujours mariné dans le gâchis, commencent à s'y accoutumer ; le déluge n'arrivera pas avant notre mort... Il vaut donc mieux fermer les yeux, ne gêner personne et déclarer que nous sommes admirables : ce qui évite les histoires désagréables, les efforts exténuants et nous plonge dans le contentement douillet de tout ce qui est français. Ils terminent en déclarant qu'*Ostwald est un crétin* : ce qui avance beaucoup notre perfectionnement national !

Bref, nous nous débinons comme la maîtresse de maison qui, sachant son rôti brûlé mais son potage parfait, critique le potage pour faire passer le rôti. Nous aimons qu'on nous critique quand nous sommes au-dessus de la critique ; nous détestons les conseils quand ils pourraient nous être utiles.

Depuis vingt-sept ans que j'appartiens à l'Enseignement supérieur, j'y vois se développer les conséquences d'une mauvaise organisation. Au début tout semblait admirable ; nous allions émerveiller le monde par notre production scientifique. Il faut déchanter. Les défauts de construction apparaissant en lézardes. Personne n'ose plus nier que le monument ne s'effondre de partout.

L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR EST DISPERSÉ, INCOHÉRENT, DÉSORDONNÉ, SANS DIRECTION. Mi-supérieur, mi-primaire, n'ayant pas su définir son vrai rôle, oscillant entre la science du contremaître et les billevesées des mathématiciens, ses résultats sont lamentables.

Les fautes commises sont à ce point grossières qu'elles n'échappent

529977

plus aux administrateurs dont la fonction est de rassurer le public et de lui déclarer que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes universitaires. Les critiques que j'énonce se trouvent explicitement dans le préambule d'un projet de loi récemment déposé sur le bureau du Sénat.

On s'est avisé de chanter le dithyrambe en l'honneur de la Science française actuelle. Le ministère s'est mis en frais d'une préface. Il résulte de ces documents officiels que si la France a longtemps tenu le premier rang, elle occupe actuellement l'un des derniers. Il fut une époque où les mathématiciens auraient été présentés par Laplace, les physiciens par Fresnel, les naturalistes par Lamarck ou Cuvier, les astronomes par Arago, les chimistes par Berthollet ou Thénard; ils ont été dénombrés par MM. X, Y, Z, qui ont trop de bon sens pour ne pas se douter du rang qu'ils occupent devant ces gloires.

Jamais la France ne fut si vide d'hommes, je ne dis pas couverts de croix et d'honneurs, mais faisant date, sûrs de vivre dans une histoire de la Science. Quand les journalistes sont à bout de ressources, ils invoquent Pasteur et Berthelot nés en 1822 et 1827. Pour constituer un ministère qui se tînt, on lui donna l'étai de sept hommes nés vers 1840. De sorte qu'en 1915 la France fut défendue par des hommes politiques élevés sous Louis-Philippe....

Un jeune Portugais, chassé de Belgique et venu s'échouer à l'Institut électrotechnique de Toulouse, me vantait chaleureusement ses maîtres de Montefiore. Je lui demandai ce qu'il pensait de nos Facultés. Avec cette politesse malhabile des étrangers, il me répondit : « Oh! c'est comme en Portugal ». Il y a du bon, pensai-je; nous ne sommes guère au-dessous du Portugal!

Cet état de choses est archiconnu hors de nos frontières. Nos étudiants étrangers (que le Ministère affecte de croire ébahis d'admiration pour nous) ne se gênent aucunement pour dire qu'ils *achètent un diplôme au bazar le moins cher.*

Ce n'est donc pas la peine de faire les discrets : notre discrétion n'a d'inconvénients que pour nous-mêmes. Nous ressemblons à ces aveugles qui visitent les expositions de peinture pour se donner le change : ils ne trompent pas les voyants. De ne pas avoir reconnu nos plaies, nous avons failli mourir : ce sont lâchetés à ne pas recommencer de sitôt.

*
* *

La critique de notre organisation scientifique est intéressante comme révélant les mêmes vices que notre organisation économique et sociale. Le lecteur, le plus ignorant de l'agencement d'un laboratoire, comprendra ce que je blâme, par comparaison avec ce qu'il connaît d'ailleurs. Je rappelle quelques principes d'Économie politique qui sont le *b*, *a*, *ba*, de cette science, mais que l'État français ignore obstinément.

L'État français ignore l'existence des chemins de fer; il en est toujours au temps où l'on mettait une semaine pour aller de Toulouse à Paris. Conséquemment à 20 et 33 kilomètres de Toulouse, c'est-à-dire à 20 et 33 minutes, existent deux villages, Muret et Villefranche-de-Lauraguais, affublés d'un sous-préfet et d'un tribunal.

Castelsarrazin est à 21 kilomètres de Montauban, Moissac est à 10 kilomètres de Castelsarrazin. De sorte qu'après une petite promenade de digestion, les présidents des tribunaux et les sous-préfets de ces gros bourgs peuvent jouer la manille à quatre, à mi-chemin du centre de leurs juridictions respectives. Tout à l'avenant.

Cette dipersion paraît aujourd'hui si choquante qu'on veut y remédier. Un projet de loi vient d'être déposé dans ce sens : il réunit contre lui toutes les routines et tous les intérêts mesquins dont les mares stagnantes sont les ordinaires bouillons de culture.

L'État français ignore le bénéfice de la *concentration*.

Une faculté ne se gérant pas autrement qu'un magasin de nouveautés, un hôtel ou un hôpital, je prends mes exemples dans ce que le lecteur connaît le mieux, le magasin de nouveautés qui concentre le commerce de détail.

La concentration amène d'abord une diminution de frais généraux (chauffage, éclairage, concierges, gardiens...). C'est évident, je passe.

Elle fournit une meilleure utilisation du personnel en permettant la spécialisation. Chez le petit commerçant, le magasin est ouvert par le commis qui est à la fois garçon de peine. Mais on trouve difficilement un commis compétent acceptant de faire les gros ouvrages. D'autre part ce commis est trop payé comme homme de peine, cet homme de peine ne l'est pas assez comme commis. Ce commis est à la fois vendeur et acheteur : or, pour écouler à 3 francs de l'étoffe achetée 12 sous, il faut d'autres aptitudes que pour acheter 29 sous ce qui en vaut 30.

La centralisation amène une meilleure utilisation des locaux et des installations. Au *Paradis des Dames* voyez le peu de mètres carrés qui correspondent au rayon... de parfumerie par exemple. Comparez cet emplacement au chiffre d'affaires. Supposez une boutique de même surface, imaginez l'apparence qu'elle aurait. On n'y verrait pas clair, on ne pourrait même pas s'y retourner.

Autre avantage : suivant la saison, l'espace occupé par le linge ou par les jouets varie considérablement; l'importance du rayon suit l'importance de la demande. Comme rien ne le sépare du voisin, il s'étend ou se rétrécit à volonté.

La concentration permet des services accessoires qui sont indivisibles par nature. Un grand magasin peut organiser rationnellement sa publicité, tandis que le petit patron doit composer lui-même son catalogue et ses annonces, à supposer que son chiffre d'affaires lui permette le luxe d'un catalogue et les frais de quelques insertions dans les journaux,

luxe et frais qui deviennent écrasants pour une maison de peu d'importance.

De même un grand magasin peut avoir un service de remise à domicile.

Un grand magasin a des facilités considérables pour ses achats, etc., etc....

*
* *

A ces avantages pour le grand magasin correspondent des avantages pour le public. Je ne suis évidemment pas de ceux qui voudraient rétablir les boutiques minuscules de nos pères, par pitié pour les petits commerçants.

On ignore généralement quel assainissement du marché ont produit les grands magasins, en supprimant le marchandage et le crédit, en permettant une comparaison plus facile des produits vendus, en établissant un cours connu du public, en se faisant une concurrence honnête qui maintient les prix et empêche les accaparements.

Que le lecteur réfléchisse au sens des deux mots qu'il entend si souvent et si sottement opposer : la *concentration*, la *décentralisation*.

Un exemple fixera ses idées.

Il existe en France d'importantes imprimeries à Tours, à Meaux, à Villefranche-de-Rouergue, à Toulouse... : voilà de la *décentralisation*. Est-il nécessaire d'ajouter que ces imprimeries ne sont importantes que par ce qu'elles *concentrent* un grand nombre d'ouvriers et d'installations?

La *concentration* s'oppose, non pas à la *décentralisation*, mais à la *dispersion*. Il est bien clair que des imprimeries considérables ne peuvent exister en un grand nombre de points différents : il n'y a pas en France assez de papier à noircir. Mais telle petite ville doit sa prospérité à sa grande imprimerie, telle autre à sa grande fabrique de chapeaux de paille, une troisième à son usine de produits chimiques : ces industries sont à la fois décentralisées et concentrées. Qu'on cesse donc de nous raser avec la décentralisation comme excuse d'une dispersion néfaste! Si vous avez dix localités à enrichir, installez dans chacune une usine importante; n'y mettez pas un dixième de chacune de ces dix usines.

Vous êtes tentés de me trouver bien naïf de vous expliquer ces choses banales. Prenez garde de porter des jugements trop durs que, respectueux des hommes évidemment éminents qui dirigent les destinées de l'Enseignement supérieur français, vous regretteriez plus tard! Ces messieurs, évidemment éminents à les juger par leurs costumes, les ignorent, ces banalités!

Si la concentration est nécessaire, l'Économie politique nous apprend que son utilité atteint asymptotiquement une limite. En d'autres termes, il est bon pour le public qu'au *Louvre* s'opposent le *Printemps* et le *Bon Marché*. D'autre part ces magasins ne trouveraient eux-mêmes aucun intérêt avouable à fusionner. A partir du point où tous les services accessoires sont rendus possibles, où les employés peuvent être com-

modément spécialisés, la concentration perd ses avantages. Elle tend à tourner au monopole, monopole qui n'a pas l'excuse des chemins de fer et des moyens de transports gérés ou surveillés par l'État.

Il est donc utile qu'il existe un petit nombre d'établissements similaires, se faisant concurrence, entre lesquels le public puisse choisir, qu'il différencie peu à peu : le client du *Bon Marché* n'est pas celui des *Galeries Lafayette*.

Personne ne conteste ce qui précède. Reste à montrer que toutes les sottises dont meurt l'Enseignement supérieur français sont dues à l'ignorance de ces principes fondamentaux de la science économique. Assurément quelques idiots trouveront singulier qu'au début d'un ouvrage scientifique, je parle du *Bon Marché* et des *Galeries Lafayette*; ils s'imaginent qu'on prend au sérieux leur Science *idole*, leur Science *maîtresse adorée*; ils croient vivre il y a trente ans où ces sottises avaient cours et rapportaient de la considération et des places.

*
* *

Pour préciser la portée de mes critiques, fixons d'abord les conditions que le développement superficiel extraordinaire de la science au XIXe siècle impose dorénavant au travail scientifique. Il est absurde de raisonner sur l'exception, c'est-à-dire sur le génie : posons que le génie produit des travaux admirables sans laboratoire, sans outillage, que les découvertes quittent sa cervelle tout armées comme Minerve le front de Jupiter. De génies scientifiques en France, aujourd'hui, on ne connaît pas d'exemplaire. Nos plus grands savants sont d'excellents travailleurs; les plus décorés ont usé leur vie sur des travaux éminemment secondaires : ils n'ont du génie que la patience.

Or pour ces bons travailleurs (encore leur nombre est-il restreint et les deux mains sont plus que suffisantes pour les compter dans chaque spécialité) faut-il des conditions de travail possible. L'idée loufoque qu'on fait quelque chose avec rien, n'est pas de mise dans l'enseignement supérieur.

D'OÙ LA NÉCESSITÉ DE LABORATOIRES BIEN ORGANISÉS, D'UNE CONCENTRATION PAR SPÉCIALITÉS, D'UN GROUPEMENT DES SAVANTS S'OCCUPANT DE QUESTIONS DONT L'ÉTUDE EXIGE UN ENSEMBLE D'INSTALLATIONS COMMUNES.

Vers 1885, quand on a voulu renouveler l'enseignement supérieur français, on s'est heurté à des obligations politiques. Il fallait (je l'accorde pour éviter toute contestation) donner un lot de fonctionnaires et d'étudiants à vingt villes importantes. Tenant compte de ce qui existait, de ce dont les diverses régions avaient un besoin plus immédiat, on pouvait créer des centres d'études, ici de Physique générale, là de Mécanique appliquée, ailleurs de Chimie.... Aux politiciens peu importait l'étiquette, pourvu que leur ville d'élection reçût un surcroît de fonctionnaires et d'habitants. Au contraire chaque ville, se

distinguant par des Instituts spéciaux, se serait attachée à rendre prospères ces organismes caractéristiques. Toutes proportions gardées, nous aurions eu des Cambridge et des Oxford.

Repoussant un plan si sage, si rationnel et si souple, on a créé dix-huit Universités *complètes*! et, par surcroît, des sous-facultés, des écoles de plein exercice, etc., etc.

On a dispersé les efforts.

Une préfecture se serait crue déshonorée de ne pas avoir, je ne dis pas un centre d'études, mais une portion de la manne budgétaire.

Conséquence : la plupart des facultés des sciences (je ne m'occupe pas des autres) ne vivent que sur le papier; ce sont des squelettes sans existence utile, faute d'installations suffisantes, de laboratoires outillés, dans l'impossibilité de supporter ce que l'industrie nomme les frais généraux.

*
* *

Pour montrer la nature de cette impossibilité d'existence utile, je prends comme exemple le laboratoire de physique de la Faculté des Sciences de Toulouse. Ainsi personne ne doutera de l'exactitude des précisions que je fournis. Il s'agit d'un enseignement fondamental et d'une des plus grandes Facultés de France.

Mes renseignements sont officiels.

Je reviendrai sur la question de l'enseignement. Je commence par étudier la partie pécuniaire du fonctionnement. Pour deux professeurs, un chef de travaux et deux préparateurs, pour les travaux pratiques de 150 élèves en moyenne (licence et P.C.N.), pour les frais de cours, pour nos recherches personnelles, nous avons annuellement en tout moins de 6 000 francs. De sorte que l'achat d'un seul appareil par les professeurs et le chef de travaux épuise notre budget. Sur les 6 000 francs, pour mes frais de cours et mes recherches, j'ai personnellement 1 300 francs à dépenser tous les ans.

Or considérez ce qu'un laboratoire de physique implique d'installations qui ne sont ni plus ni moins complètes, ni plus ni moins coûteuses d'achat et d'entretien, qu'on soit deux ou dix à les utiliser. Nous n'avons pas de salle de balances ni de mesures de précisions, pas un coin pour loger à poste fixe un galvanomètre sensible. Nos accumulateurs sont vieux de quinze ans; pas le sou pour les changer : de temps à autre les bacs éclatent et la batterie est diminuée d'un élément. Aucun moyen de faire commodément du froid ou du chaud. Aucun laboratoire pour le travail personnel des étudiants. Deux salles pour chacun de nous, l'une servant de bureau, l'autre de laboratoire personnel. Bref la misère.

Ne dites pas que, travaillant dans une cave, Pasteur a laissé des travaux immortels. Laissons Pasteur et son génie : il ne s'agit ici que du traintrain normal d'un établissement d'instruction publique, et de la possibilité qu'ont les élèves et les professeurs de travailler utilement,

élèves et professeurs qui ne sont ni des Pasteur ni des Fresnel. Les frais généraux, les installations communes sont les mêmes que les professeurs soient 1 ou 10, les élèves 10 ou 300. Au lieu de 36 laboratoires de Physique, si nous en avions six, *le budget et le personnel restant le même*, au total les six seraient convenablement outillés; tandis que les 36 sont dans la purée,... purée honteuse pour un grand pays, mais purée que pas un pays de notre population n'est capable d'empêcher, pour riche qu'il soit;... et nous ne le sommes plus!

Il y a quelques années, me promenant près de Séverac-le-Château, j'aperçus une bâtisse close qu'on me dit être un Observatoire dépendant de l'Université de Montpellier. Cet édifice ultra modeste, isolé dans une campagne solitaire, manifestement abandonné depuis des semaines,... était le symbole de notre vie universitaire scientifique.

L'Université de Toulouse possède un observatoire de montagne au Pic du Midi, mal outillé et qu'on n'habite que pour ses péchés. N'empêche qu'une Université voisine éprouve le besoin d'en construire un autre plus petit, plus inhabitable, plus inutile s'il est possible. C'est toujours la dispersion, l'éparpillement, le bluff,... approuvé par le ministère comme matière à discours, comme amenant la création d'une nouvelle fonction, infime, mal payée, sinécure pour quelque fils à papa, ignorant et incapable.

Les laboratoires modernes sont analogues à des usines : la division du travail s'impose. Pour que vos accumulateurs durent et fonctionnent convenablement, il faut les soigner. Ne pouvant le faire vous-même, il faut y déléguer un garçon. Au laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Toulouse, nous avons en tout deux aides qui doivent balayer, allumer les feux, faire les commissions, servir de préparateurs, etc., etc...; pouvons-nous leur imposer par surcroît le soin systématique des accumulateurs?

La division du travail n'est possible que dans les grandes industries et dans les grandes installations scientifiques; elle implique des frais généraux énormes : elle ne devient économique que s'ils se répartissent sur un grand nombre de travailleurs. Il est vrai qu'elle est aujourd'hui la condition pour que ces travailleurs puissent travailler. Taylor veut que les outils soient affûtés d'une certaine manière. Première conséquence : il faut un atelier de réaffûtage; corollaire : il faut une usine considérable. Vous ne sortirez pas de là : le travail *en chambre* a vécu. C'est pourquoi les Facultés des Sciences se meurent.

Je me trompe; elle n'ont jamais existé que dans les discours officiels.

*
* *

Le travail scientifique exige non seulement des laboratoires et des appareils, mais encore des moyens d'information et de publication : il faut savoir ce que les autres trouvent et dire aux autres ce que vous

faites. D'où la nécessité de bibliothèques spécialisées et de recueils pour les mémoires élaborés par l'ensemble d'un même groupement.

Sous le nom d'Annales, ces recueils existent dans la plupart des Facultés. Mais ils renfermèrent une salade de travaux hétéroclites; le plus souvent des mémoires littéraires voisinent avec les sciences les plus diverses. Conséquence : personne ne les achète. Il est en effet dur pour un laboratoire de physique de dépenser vingt-cinq francs par an pour un volume ne contenant souvent pas un mot de physique.

C'est toujours la dipersion et le gâchis.

Il existe en France, pour chaque science, des recueils généraux. Malheureusement ce sont des affaires commerciales particulières, appartenant à leurs éditeurs, dirigées par certaines coteries..., l'opposé de ce que devraient être des publications scientifiques impartiales. Vous comprenez la joie qu'éprouve un *minus habens* à qui des intérêts pécuniaires confient la direction d'un de ces recueils, quand il peut évincer un travail indépendant. Ne voyez là aucun grief personnel : je ne me suis jamais mis dans le cas qu'on me refuse un mémoire.

Nos moyens d'information sont insuffisants à l'égal de nos moyens de publication. Il nous faudrait savoir toutes les langues et passer des journées à dépouiller les revues étrangères : métier qui conduirait à l'abrutissement par les voies les plus rapides.

Ce travail de fiches devrait être confié à des bibliothécaires spéciaux, ce qui est impossible dans nos facultés squelettes. Ici encore la division du travail impose une concentration, un groupement des hommes s'occupant de sciences connexes.

La conséquence, lamentable pour la France, est l'impossibilité d'une documentation sérieuse. Vu la population scientifique de langue allemande (les Hollandais, Danois, Suédois, Norvégiens, Russes la grossissent aujourd'hui pour des raisons évidentes), il existe en Allemagne des périodiques de documentation, *documentation tendancieuse, mais intelligente et consciencieuse*, due à des hommes spécialisés qui font métier de lire et de résumer les mémoires rentrant dans certaines catégories. Sans être forts, mais se limitant à une certaine portion de la Physique (par exemple), ils donnent une idée juste des travaux dont ils rendent compte, tandis que les analyses que publient nos périodiques sont composées au petit bonheur par des gens non spécialisés, mal payés, qui ne voient dans leur besogne qu'une assommante corvée.

Le groupement et la concentration nous sauveraient. Il n'est pas nécessaire que nos divers périodiques fournissent en multiples expéditions des analyses composées par-dessous la jambe. Il suffirait qu'un Institut de Physique (par exemple) décemment organisé se chargeât de cette besogne, sous sa responsabilité scientifique. Elle exige seulement un petit nombre de savants *spécialisés*, qui rendraient compte des mémoires intelligemment, par cela même qu'ils se renferméraient dans leurs spécialités, les analyses comme les mémoires dont ils rendent

compte, ne s'élevant jamais au-dessus de la discussion de quelques points de détail. Encore faut-il savoir de quoi l'on parle et ne pas se borner à copier, avec le titre des mémoires, quelques phrases au hasard tirées de la conclusion. Bien fait, ce recueil d'analyses se vendrait en Hollande, Danemark, Suède, Norvège, Russie; il combattrait heureusement la tendance allemande à supprimer ce qui vient de chez nous et à exalter ce qu'elle produit.

Cela n'est possible que sous le contrôle *effectif* d'un nombre suffisant de physiciens compétents : ce qui nous ramène au groupement *effectif* des spécialités et non pas seulement au groupement en sociétés scientifiques de gens qui vivent à 800 kilomètres les uns des autres et qui du reste se sont montrés incapables de composer... un Recueil de Constantes!

*
* *

Réglons en passant la question de l'*esperanto*, de l'*ido*, et autres *volapücks*.

Je mets en doute, non pas certes le patriotisme de ceux qui voulaient nous imposer ces jargons, mais l'intelligence de ce patriotisme.

Posons qu'une langue scientifique internationale est souhaitable *en théorie*. Comment nos réformateurs espéraient-ils que la portion de l'Europe inféodée à l'Allemagne (Hollandais, Danois, Suédois, Norvégiens, Suisses) allaient abandonner l'allemand, étendard et symbole de puissance, pour parler *ido* ou *esperanto*? Ils ne se bercent évidemment plus de cet espoir. Était-il difficile d'en juger sainement avant la guerre? Dieu sait quelles invites j'ai reçues des protagonistes Bourlet et Couturat, mes camarades! Cependant vous chercherez en vain mon nom sur leurs listes. Je soutiens donc une opinion qui ne doit rien à la Guerre, opinion que les hommes intelligents ne se gênaient pas pour exprimer.

Les Anglais et les Russes ont déclaré cent fois qu'ils apprenaient volontiers le français, mais refusaient de perdre leur temps sur un patois. Les Anglais continuaient à écrire leurs mémoires en anglais. Les Russes, nous voyant lâcher jusqu'à notre langue, écrivaient en allemand. Quant aux Latins, l'Italie ne voyait alors que par les yeux de l'Allemagne, et l'Espagne ne peut compter pour un débouché très important de livres scientifiques.

On insistait : il ne s'agit pas d'écrire les mémoires en volapück; cette langue ne doit servir que pour les résumés.

Résumés à l'usage de qui, sinon des Français? alors pourquoi ne pas écrire en francais? L'Allemagne a depuis longtemps ses périodiques de documentation : nos réformateurs espéraient-ils qu'ils s'imprimeraient en ido?

Ils croyaient montrer de la grandeur d'âme à se déclarer citoyens du

monde! Esprits faux, esprits faibles, ils se précipitaient sur des listes en tête desquelles se pavanaient des généraux et des membres de l'Institut! Ils étaient fiers d'annoncer qu'ils avaient traduit Molière et Leibnitz en volapück et que, vraiment, ni Molière ni Leibnitz n'y perdaient rien!

Ah! les Allemands devaient bien rire (Ostwald le premier) quand ils nous voyaient saccager le peu qui nous restait de notre héritage intellectuel. Ils devaient bien rire à prévoir l'heure où nos écoles primaires (nos réformateurs ont pétitionné pour cela) enseigneraient l'esperanto d'abord,... puis le français, si par hasard du temps restait pour cette besogne secondaire!

Mais l'esperanto est commode en voyage!

Je vais vous dire, espérantistes, une bonne chose : ouvrez largement vos oreilles. Quand, voyageant à l'étranger, vous entrerez dans un restaurant, on devinera que c'est pour manger; sinon, fourrez votre doigt dans la bouche : avec étonnement, vous constaterez que ce volapück là est universellement compris. Faut-il que je vous enseigne les gestes qui expriment qu'on veut dormir..., ou satisfaire tel autre besoin?

*
* *

L'éparpillement en un nombre trop grand de Facultés squelettes rend impossible tout enseignement, je ne dis pas raisonnable, mais décent.

Dans la Faculté des Sciences de Toulouse (qu'on prétend la seconde ou la troisième de France), l'enseignement de la physique est représenté par deux heures chaque semaine. N'est-ce pas bouffon, pour celui qui sait la physique moderne et son rôle industriel, de convier les étudiants à son étude en leur fournissant, en tout et pour tout, deux heures de Cours par semaine?

Certes il existe un cours de physique pour les P. C. N.; mais son niveau est inférieur à celui du lycée, la dispersion, l'éparpillement chevauchant sur tous les ordres d'enseignement, tout allant à peu près et au petit bonheur, à vau l'eau et à la grâce de Dieu qui paraît s'en désintéresser complètement!

Avec mes deux heures par semaine que tirer de gens qui m'arrivent ne sachant rien, de ces bacheliers dont parle la note officieuse suivante que je découpe dans *Le Temps* du 27 mai 1915.

« Au surplus, les candidats aux examens universitaires bénéficieront, après la cessation des hostilités, de mesures *largement réparatrices*. Il est maintenant prévu que tout étudiant empêché par la mobilisation, l'appel de sa classe ou un engagement volontaire de se présenter à un examen de baccalauréat ou de faculté, rencontrera, après la guerre, de telles conditions de bienveillance qu'il lui suffira de quelques jours pour se mettre en état de réussir. Et il est entendu aussi qu'on facilitera à ces

jeunes gens la continuation de leurs études en leur assignant comme garnison une ville d'université. »

Le droit à l'ignorance, ils l'appellent des *mesures réparatrices*. Ils espèrent relever la France en conférant des diplômes. Quand ils auront diplômé tout le monde, ils sont persuadés que les étrangers prendront une haute opinion de notre science. Faute de nous voir à l'œuvre, l'étranger pouvait ignorer notre courage : nous nous sommes révélés un peuple de héros! Hélas! l'erreur est impossible pour notre science dont nous fournissons journellement l'étiage. L'étranger ne saurait être favorablement surpris; il a depuis longtemps les pièces du procès!

L'industrie d'un pays dépend de la science des ingénieurs et non de leurs diplômes; il importe peu qu'un professeur soit agrégé, quand il ne sait rien.

Les diplômes sont des signes qui ne remplacent pas la chose signifiée.

L'enseignement secondaire nous envoie des élèves nuls qui prétendent arriver au certificat de physique en un an. Pour cela l'État leur offre deux cours pas semaine. Voilà le bilan de l'enseignement français actuel. Étonnez-vous que notre industrie périclite!

Il est évident que mon cours n'en vaudrait pas moins devant cinquante auditeurs que devant dix. Réunissez les professeurs de physique de plusieurs facultés en un Institut de physique; sans qu'il en coûte un sou de plus à l'État, vous constituez un enseignement convenable, *d'autant meilleur que chaque professeur enseignera la partie qu'il connaît le mieux.*

Comment éveiller l'émulation entre les six ou huit élèves qui suivent mon cours? Quel bénéfice intellectuel conservent-ils de leur vie dans la faculté, isolés, sans camarades avec qui parler de leurs études, sans l'excitation qui naît de la concurrence?

Les étudiants de nos facultés de province coûtent horriblement cher à l'État, ils sont dupés par l'État : admirable résultat des sacrifices pécuniaires consentis par la nation!

Je vous parle de Toulouse. Que dire de ces ombres de Facultés : Clermont, Poitiers, Dijon, Caen, Rennes?

*
* *

L'enseignement pratique dont l'importance grandit tous les jours, est dérisoire dans nos facultés squelettes.

J'ai moyennement de 8 à 10 élèves. Jamais l'administration n'a voulu comprendre qu'un laboratoire d'enseignement, de physique au moins, doit occuper le même espace, ou à peu près, pour 10 élèves que pour 100. J'ai beau lui expliquer que la plupart des expériences doivent être montées à poste fixe, qu'il est matériellement impossible de régler des appareils puis de les remettre dans des armoires faute de personnel,

faute de temps, et parce que rien n'abîme les appareils comme ces transports incessants). On me répond : « Vous avez tant de mètres carrés pour tant d'élèves : de quoi vous plaignez-vous? » C'est idiot; je ne me gêne pas pour leur dire en ces termes; mais c'est comme si je le disais au vent qui passe : ils ne comprennent pas parce qu'ils sont incapables de rien comprendre.

La dispersion rend impossible le recrutement des chefs de travaux et des préparateurs. On a voulu combattre cette pénurie par des moyens... stupides comme toute l'agitation de ces dernières années : on donne aux chefs de travaux le titre de maîtres de conférences *adjoints*, à la condition qu'ils soient docteurs. Pour le cas que je fais des titres, cela ne me gêne en rien : on peut aussi bien les appeler grands maîtres.

Mais jaugez l'intelligence de nos gouvernants! Un préparateur *non docteur*, bien vu par l'administration, peut être nommé *maître de conférences*. S'il est chef de travaux et docteur, on le nommera *maître de conférences adjoint*. N'est-ce pas ingénieux? Au surplus avec ce qu'est devenu le doctorat, il faut vraiment du poil dans la main pour ne pas conquérir ce titre... et du coup retomber adjoint!

Qu'on appelle les chefs de travaux comme on voudra, on n'en trouvera de bons que si on les paie décemment, ce qui est impossible avec la dispersion actuelle. Mais un Institut de Physique pourrait s'offrir le luxe d'un professeur chargé des travaux pratiques que des aides suffiraient à surveiller.

*
* *

Les objections à la spécialisation des facultés me paraissent d'une incommensurable sottise!

D'abord la plus sotte : les jeunes Français doivent trouver dans leur ville natale la possibilité de se développer dans toutes les directions!

Les jeunes Français de quelle ville? J'habite Tarbes, Auch ou Agen; faut-il que je trouve à Tarbes, Auch ou Agen une faculté complète?

Si oui, posons qu'on en créera 36 000, autant que de communes.

A moi qui par hypothèse habite Tarbes, Auch ou Agen, en général qui habite toutes les communes, toutes les sous-préfectures, et les trois quarts des préfectures, que m'importe d'aller à droite ou à gauche pour étudier ce qui me plaît davantage? Croit-on les dispositions de nos éphèbes si impérieuses, si nettement indiquées dès le berceau, qu'ils ne puissent modifier leurs goûts suivant les facilités qu'ils trouvent dans le voisinage? Faut-il créer des tissages de soie à Saint-Brieuc pour les aspirants canuts bretons? Faut-il élever un conservatoire de musique à Tulle pour les ténors limousins?

Quel mal voyez-vous, au cas où les mères ne consentiraient pas à lâcher leurs rejetons, à ce que les jeunes Toulousains s'occupent plus spécialement de chimie et les jeunes Bordelais d'électricité?

Il n'existe de classes de Spéciales que dans un petit nombre de Lycées : qui s'en plaint? Les familles sont assez intelligentes pour comprendre (si l'on daignait le leur expliquer) que certaines institutions sont indivisibles par nature.

Objection qui semble d'abord plus forte : les divers enseignements s'entr'aident. Pour soutenir pareille calembredaine il faut n'avoir jamais mis les pieds dans une faculté! Si quelqu'un notait le nombre de visites qu'un physicien fait en dix ans à son collègue chimiste (je ne dis pas à son collègue naturaliste) pour lui demander quelque renseignement, on serait étonné de l'ignorance dans laquelle nous sommes des voisins; non par mépris, mais parce que nous n'avons rien à tirer les uns des autres.

Les physiciens, même travaillant des sujets différents, se servent en commun d'appareils, de méthodes; ils peuvent s'entr'aider. Que voulez-vous qu'un physicien demande à un naturaliste? et dans l'hypothèse la plus défavorable à ma thèse, quelle chance a-t-il de rencontrer chez l'unique représentant de chaque spécialité (à supposer qu'elle existe dans nos facultés squelettes) justement l'homme capable de lui fournir le renseignement désiré? Nous sommes complètement isolés, abandonnés à nous-mêmes; il nous est impossible de trouver un conseil, un enseignement, voire un renseignement, chez tout autre que notre collègue de la même spécialité,... quand il existe.

*
* *

A peine les facultés eurent-elles pompeusement reçu leur charte, l'incohérence des efforts apparut si nettement qu'on en bouleversa l'organisation par la création d'Instituts, avec directeur spécial *chargé de donner une impulsion* (!?). Comme si le changement d'étiquette pouvait transformer une organisation vicieuse! Ces instituts ne sont le plus souvent qu'un écriteau sur une porte, et l'origine de poncifs, ornements obligés des palabres ministérielles : *organismes souples*, *travail régional*, *décentralisation provinciale*, etc., etc.

La création des Instituts est un hommage implicite à la thèse que je soutiens (spécialisation des facultés), mais dans des conditions où cette thèse devient grotesque.

Après la création d'Instituts ayant un budget propre, logés dans des bâtiments spéciaux, dirigés par des directeurs indépendants, l'argument de la nécessité d'une fusion, d'une communion des divers enseignements s'effondre piteusement. Mais cette division des facultés en Instituts ne change pas le nombre total des professeurs; elle ne remédie pas à la dispersion, à l'éparpillement : elle ne fait que les augmenter.

Par exemple, la création d'un Institut électrotechnique à Toulouse n'a pas mis un physicien de plus à la Faculté! Mais avant elle, nous étions deux à enseigner la Physique générale : je reste seul. On a créé un rayon de plus, en empruntant des comptoirs à la boutique préexis-

tante. Avec un squelette, on a fait deux moitiés de squelettes, et dans la séparation quelques os se sont perdus.

L'Université de Toulouse possède des Instituts électrotechniques, de Chimie agricole, de Pisciculture, d'Hydrologie, de Mécanique appliquée. Chacun de ces *organismes souples* est doté d'un budget spécial, d'un directeur autonome, d'un conseil de perfectionnement. Or nous sommes 23 sur l'affiche : c'est avec ces 23 personnes qu'on fait marcher la Faculté des Sciences, l'Observatoire et les six Instituts qu'on a trouvé bon de créer !

Le plus clair du résultat est que tous les enseignements sont faussés par la nécessité de servir à plusieurs fins.

Pour un beau gâchis, c'est un beau gâchis !

Toutes les facultés de France ont installé des Instituts, de sorte qu'actuellement nous n'avons plus 18 Facultés *complètes ou soi-disant telles*; nous avons cinquante Instituts *complets ou soi-disant tels* sans augmentation du budget de l'État ni du personnel, mais avec un éparpillement, une dispersion, un gâchis corrélatif dont rien, pas même la politique, ne peut donner une idée !

Organiser ces cinquante instituts est un travail impossible. La plupart sont mûrs pour la faillite. **S'il sont capables de vendre des diplômes (un guichet suffit pour cela)**, ils sont aussi incapables de fournir de bons élèves que de recruter des professeurs compétents.

Pas un mémoire scientifique de quelque valeur ne sort de ces Instituts.

*
* *

Voici quelques détails pittoresques.

Nous avons à Toulouse un Institut de Pisciculture. On y élève les petits poissons avec de *l'eau de puits*, et les gros, qui supportent plus aisément l'eau malsaine, avec celle du canal de Saint-Martory, canal utilisé pour l'irrigation et dont on prend l'eau 25 mètres avant qu'il ne revienne porter ses boues à la Garonne. Et nous sommes à moins de 100 kilomètres des Pyrénées où fort heureusement les truites pullulent, *quand on ne les détruit pas à la dynamite* !

Nous avons un Institut d'Hydrologie qui est ouvert depuis quatre ans et reste... sans aucun élève. Ils ont eu la géniale idée d'inviter à l'étude de la Géologie, etc., etc., les médecins des stations balnéaires. Voyez quel intérêt pour le médecin de Barège, de connaître la constitution géologique du bassin de Vichy, *et même celle du bassin de Barège* ! Tout de même le bon sens l'emporte ici sur l'attrait d'un diplôme.

Ils ont déclaré que, le Languedoc étant un pays agricole, un Institut agronomique était nécessaire : belle application du principe des Instituts développant les ressources locales. Or, chose curieuse, les élèves de cet institut sont en majorité Russes, Argentins ou Chinois ! Vous désirez des précisions officielles ? En 1914 sur 26 élèves, il y avait 13 Russes,

3 Espagnols, 2 Égyptiens! Là-dessus le doyen entonne un chant de triomphe et déclare officiellement « l'Institut agricole parfaitement adapté à notre climat, à nos cultures et à nos usages ». Mais alors qui trompe-t-on? dans cet Institut si parfaitement adapté, que font les 13 Russes, les 3 Espagnols et les 2 Égyptiens?

Dieu sait quelles moqueries le goût allemand du colossal excite chez nous qui avons la manie de l'étriqué, du pauvre, du mesquin. Allez visiter le nouvel Institut de Chimie que l'Université de Toulouse n'a pas encore achevé de construire. Vous le trouverez dans le plus vilain quartier, noyé dans un pâté de maisons, tout de guingois, obscur, sans entrées, sans terrain pour un développement ultérieur! Qu'un conseil d'Université ait accepté un tel plan, montre une indifférence coupable! Ne vous récriez pas; allez y voir! Et quand vous aurez vu, vous réclamerez peut-être le silence par pitié; mais vous ne chercherez pas d'excuses!

Toute l'Université de Toulouse est sur ce modèle. Ayant rabioté le grand séminaire, il fallait, n'est-ce pas? qu'il servît à quelque chose. Allez-y voir l'installation de la bibliothèque universitaire pour apprendre comment, en 1910, les Français CRÉENT une bibliothèque! Allez visiter la salle des œuvres d'art! on dirait d'un caveau, d'une crypte. Dans ce froid humide, dans ce noir, les plâtres moisissent! Sachez que ces installations ont coûté plus cher que des bâtiments neufs; sachez qu'à Toulouse, à un kilomètre des facultés, le terrain desservi par des tramways ne vaut pas 3 francs le mètre!

Avant la Guerre, nous étions un pauvre peuple ratatiné, rabougri, atteint de misère physiologique, à circulation ralentie, ayant peur de tout, redoutant les pensées fortes et les longs espoirs. Il suffira, je l'espère, d'un coup de balai pour reprendre goût à l'action!

*
* *

Dans ce qui précède, je ne dénombre qu'une partie des avantages de la spécialisation des facultés et du groupement des savants s'occupant de questions similaires. Ils sont principalement matériels : ils consistent dans la possibilité d'installations générales communes (salles de mesures, salle des horloges, machines à chaud et à froid, installations électriques, accumulateurs, etc., etc.). Ils consistent encore dans la possibilité d'obtenir des renseignements et des conseils, dans l'existence de revues (mémoires et analyses) surveillées de près et impartialement par des compétences nombreuses, par suite difficiles à domestiquer. Ce groupement des spécialistes dans des facultés distinctes ne suppose pas que les savants se livrent exactement aux mêmes recherches. La Physique, par exemple, compte bien des branches; rien ne suppose que nos savants ont tous choisi la même. Que vos études se rattachent à l'Optique ou à l'Électricité, vous aurez besoin d'un arc

électrique. Que vous vous occupiez de la photographie ou des solutions, vous utiliserez des balances.

Mais d'autres Instituts sont nécessaires, de la nature de ces *séminaires* dont les palabres ministérielles nous ont rebattu les oreilles, mais dont il n'existe en France qu'un exemplaire n'ayant rien de commun avec l'Université : l'*Institut Pasteur*.

Il s'agit de grouper en permanence un certain nombre de savants s'occupant de questions étroitement connexes et, par l'exemple de leur travail personnel, imposant aux étudiants de passage des méthodes et des habitudes scientifiques.

Les séminaires ecclésiastiques ne valent que par leurs directeurs; de même les séminaires scientifiques.

Tout ne s'apprend pas dans les livres. Chaque partie de la science a sa technique, son manuel opératoire, *son état d'âme* qu'on acquiert seulement au voisinage d'hommes ayant longtemps vécu dans cette atmosphère spéciale. Un chirurgien vous dira qu'il existe une manière de se laver les mains dont un médecin quelconque est incapable; ce dernier vous flanque un abcès chaque fois qu'il utilise une seringue : pourtant il ne semble pas difficile d'avoir les mains propres.

Ce qui est vrai de la technique, l'est davantage de la manière de raisonner. Un botaniste ne raisonne pas comme un physicien; l'homme qui compte des franges, ne raisonne pas comme celui qui tord des fils. J'ai parfaitement conscience de raisonner de deux manières distinctes en écrivant un cours de Thermodynamique ou un cours d'Électricité. La nature de la certitude varie, la manière d'induire change : c'est précisément pourquoi n'est pas accordé à tout le monde d'écrire décemment un Cours complet de Physique. C'est encore pourquoi les mathématiciens sont grotesques quand ils marchent sur nos brisées. C'est encore pourquoi ils poussent des cris de putois effarouché quand nous traitons (ou maltraitons, comme ils voudront) les mathématiques à la manière d'un outil. Ils nous appellent « mathématiciens médiocres »; nous leur répondons par l'épithète de « physiciens idiots ». Nous n'avons tort ni les uns ni les autres. Nous sommes dans des plans différents.

Tout de même notons un point qui nous est favorable. Nos mathématiques « médiocres » donnent les mêmes résultats que leurs mathématiques « perfectionnées », tandis que leur physique n'aboutit qu'à des âneries.

Un homme comme Pasteur laisse des traditions et des élèves. Peut-être à la longue ces traditions deviendront des routines; en attendant qu'elles subissent cette déchéance, il est bon qu'en profitent le plus grand nombre possible de travailleurs, il est bon d'éviter aux débutants les tâtonnements et les faux aiguillages. Voilà le rôle d'un Institut Pasteur, l'utilité d'un séminaire. Voilà, si l'on veut, le rôle plus général d'une *direction scientifique*; mais que de difficultés rencontre une telle direction en dehors des conditions matérielles d'un séminaire! J'ai

reçu de très nombreuses lettres demandant des conseils; je sais par expérience ce qu'ils valent par correspondance.

Des séminaires[1] scientifiques ont été systématiquement créés par les Allemands : ils en ont tiré des résultats prodigieux.

*
* *

Que les Allemands nous aient fait beaucoup de mal, n'est pas une raison de méconnaître leurs qualités éminentes. Cette injustice est particulièrement déplaisante chez nos pontifes qui, avant la Guerre, encensaient à tour de bras les hommes qu'ils dénigrent systématiquement aujourd'hui.

Les journalistes qui prennent Ostwald comme tête de turc, sauront qu'Ostwald trouvait, avant la Guerre, dans la haute Université, des éditeurs charmés qui n'hésitaient pas à traduire ses plus chaleureux appels à la lâcheté. Dans la *Grande Revue*, n° 9 de l'année 1910, ils liront un article intitulé le *Grand Pas*. Après l'avoir médité, ils chercheront quels Français ont eu la triste audace de le propager. Dans une autre collection, également dirigée par un universitaire, ils apprendront comment Ostwald traite les Français et leurs Académies : à tort ou à raison, ce n'est pas le lieu de décider. En tout cas, quand on permet qu'un Allemand nous arrange de cette manière, on a tort de se plaindre de mes duretés. C'est un devoir de Français de laver notre linge sale; ce n'est pas celui d'un Allemand de l'étaler.

En nous prêchant la lâcheté et l'abdication volontaire, Ostwald faisait le jeu de son pays; ses éditeurs ne faisaient pas le jeu du nôtre : toute la différence est là.

Cet Allemand doit sa réputation extraordinaire à ce qu'il représente le type du directeur de séminaire scientifique au sens que j'ai défini. Il faisait travailler; et la somme de travail qu'il a su tirer des Allemands a quelque chose de colossal. Devant l'accumulation de mémoires de Chimie Physique qu'en 25 ans il a fait éclore, on reste stupide d'admiration. Certes tous ne sont pas d'égale valeur: il y a du mauvais, encore plus de médiocre. Mais pendant la même période, à ce labeur expérimental immense, la France ne peut opposer sur les mêmes questions qu'un peu de médiocre[2].

Les Allemands ont supporté le poids d'une guerre insensée, surhumaine, dans des conditions défavorables, grâce à leur merveilleuse organisation. Il est très gentil pour les journalistes de la railler; il serait

1. Le mot « séminaire » est pris en Allemagne dans un sens très différent de celui que j'emploie. Il va de soi que le lecteur conservera le sens ci-dessus défini.

2. Il y a vingt ans, voulant créer en France un enseignement de Chimie Physique, on envoya quelqu'un s'initier *aux bonnes méthodes en Allemagne*. Vous vous *gondolerez* d'apprendre que, depuis la Guerre, nos illustres savants ont découvert que la Chimie Physique est une science française; sans remonter à Berthollet, elle a pour pères très authentiques Sainte-Claire Deville et Raoult.

plus sage de l'admirer. Un homme comme Ostwald est infiniment représentatif. De plus en plus les efforts scientifiques ne valent que par leur coordination; les génies exceptés (faut-il répéter qu'on ne discute pas sur l'exception?), les hommes réclament des guides voyant les questions de haut, capables de distribuer les tâches, de juger les résultats, abdiquant pour eux-mêmes certains triomphes, semant la graine qui deviendra l'opulente moisson.

Voilà le rôle qu'Ostwald a joué, voilà l'origine de sa réputation mondiale, voilà ce que malheureusement il est impossible de voir en France, parce que notre organisation scientifique est incohérente.

*
* *

Je vais montrer la nécessité d'un séminaire scientifique sur un exemple concret, la Physique des Corps solides : c'est une question qui revient à chaque instant dans l'ouvrage qu'on va lire.

Le XIXe siècle a coordonné quelques résultats en Optique, Électricité, Thermodynamique. Mais bien que l'étude des déformations des corps remonte à Galilée, malgré la beauté des résultats obtenus par Navier, Cauchy, Saint-Venant,... nos idées sur la constitution des solides sont encore rudimentaires.

Au milieu du siècle dernier, des savants laborieux et bornés, dont le type est Wertheim, se sont efforcés de déterminer les valeurs numériques des constantes dont la *Théorie de l'Élasticité* admet l'existence. Ils n'ont rien trouvé de raisonnable, hors des limites de cette théorie qui suppose les déformations infiniment petites, autrement dit, qui s'occupe des phénomènes évanouissants. Ils ne se sont pas aperçus qu'ils erraient systématiquement; que ces fameuses constantes, ou n'existaient pas, ou se trouvaient comme noyées dans une série de phénomènes superposés aux phénomènes très particuliers qu'envisage la *Théorie de l'Élasticité* classique. Leur erreur fondamentale était de croire que les états actuels des solides sont déterminés par les valeurs actuelles des agents, tandis qu'ils le sont par l'ensemble des valeurs actuelles des agents et des valeurs antérieures à l'instant actuel.

Peu à peu l'étude du Magnétisme mit hors de doute la complexité des phénomènes, bien que le Magnétisme soit un cas relativement simple, la rapidité des opérations antérieures n'intervenant pas sensiblement sur l'état présent. Peu à peu s'est précisée la nécessité de raisonner sur les corps solides autrement que sur les liquides et les gaz. Ceux qui feuilleteront la série de mes mémoires expérimentaux ou les travaux théoriques de Duhem, comprendront la vanité, l'inutilité absolue d'une foule de travaux, auxquels manque seulement une vue raisonnable de la nature des questions dont ils s'occupent.

Que les ingénieurs raisonnent comme ils l'entendent, à la condition qu'ils ne prétendent pas nous imposer leur manière d'expérimenter

sur les solides. Je ne les empêche pas de définir cent paramètres plus inexistants les uns que les autres. Leurs résultats ont une grande utilité pratique; leurs méthodes d'essai répondent aux exigences industrielles. Toujours est-il qu'une expérience proprement scientifique doit tenir compte de toutes les déformations antérieures, de l'histoire entière du corps, ce qui amène une complication dont on acquiert difficilement l'idée.

Voilà donc trois groupes de phénomènes : *déformation des solides*, *magnétisme induit*, *polarisation diélectrique*, où la manière de raisonner et d'expérimenter obéit à des règles spéciales. Les physiciens ne doivent pas mesurer des « constantes » avant d'avoir démontré qu'elles existent et ne sont pas modifiables à leur gré.

Jusqu'à présent ils se sont préoccupés si aveuglément de déterminer des constantes qui ne le sont pas, que la question des corps solides reste un mystère.

Le problème des solides présente un intérêt énorme, parce que la manière raisonnable de le traiter s'applique *mutatis mutandis* à de nombreux phénomènes dont précisément je m'occupe dans ce volume.

En particulier la décomposition photochimique n'obéit pas au processus simpliste qu'on imagine d'abord : les actions photographiques sont là pour le prouver. Une quantité d'énergie ne libère pas une quantité proportionnelle d'argent : suivant la manière de fournir cette énergie, on obtient des résultats différents. Ici encore l'effet actuel dépend, non pas seulement des agents actuels, mais de l'ensemble des valeurs antérieures de ces agents.

De même la rétine est un instrument d'une invraisemblable complexité. A chaque instant sa nature varie, de sorte qu'une radiation reçue dans l'œil produit une modification subpermanente de l'appareil qu'elle excite.

La manière classique de considérer l'effet comme fonction bien déterminée des valeurs *actuelles* de la cause, est illusoire, sans valeur; elle doit être définitivement proscrite. Il y a vingt ans que je répète cela sur tous les tons; ce qui n'empêche pas les physiciens et les ingénieurs de noircir du papier en dépit du sens commun.

Dans le présent ouvrage, je passe en revue des phénomènes d'intérêt scientifique et industriel énorme; ils se rapprochent de ce qu'on appelle l'*adsorption*. Suivant les cas les pierres et les métaux lithographiques retiennent l'encre ou l'eau; le verre fixe les métaux ou la graisse, suivant quelles lois précises on l'ignore. A ces admirables sujets d'étude se rattache la teinture proprement dite.

La caractéristique des phénomènes où les solides interviennent, ce qui les distingue immédiatement des phénomènes sur les liquides et les gaz, consiste en ce que l'état actuel est déterminé par l'histoire antérieure des opérations auxquelles le corps a été soumis.

*
* *

Et nous voici revenus à l'organisation, plus exactement à l'inorganisation du travail scientifique français. Il semblerait naturel qu'un pays comme la France tînt à honneur de faciliter les recherches sur les propriétés des solides, sur tous ces phénomènes actuellement épars, mais dont la caractéristique évidente implique des méthodes expérimentales particulières et, somme toute, identiques malgré la diversité des sujets. Ce n'est pas un pur hasard si mon premier mémoire s'occupe des actions photographiques et mes travaux ultérieurs des déformations permanentes.

Mascart me disait que je perdais mon temps, que ces sujets trop difficiles ne me rapporteraient rien, que personne ne me lirait, bref qu'il valait mieux étudier les ondes hertziennes. S'il avait raison au point de vue du succès immédiat, je persiste à croire qu'il y aurait à faire pour l'étude des solides le même travail d'organisation qu'Ostwald a réussi pour l'étude des solutions.

Dans un tel sujet, aussi vaste, les efforts individuels sont quasiment impuissants ; les efforts collectifs sont nécessaires : ils seraient largement payés par des découvertes importantes.

Mais pourquoi ne pas laisser les gens travailler à leur guise? pourquoi les réunir dans un bâtiment spécial pour étudier les corps solides? Vous risquez d'atrophier leur génie, de détruire leur originalité!

Nous l'avons trop souvent entendue cette phrase chère aux ratés, aux fruits secs. Pour eux, le génie c'est le désordre. Je ne sais quel chimiste me disait qu'une des forces de Berthelot était son habileté à transvaser les gaz : et cela ne m'a pas étonné. Le génie tout seul n'a jamais rien créé, parce que, pour génial qu'on soit, une vie humaine est trop courte pour refaire le travail des siècles. Il y a des choses qu'il faut apprendre parce que, pour en revenir à Berthelot, quand on est chimiste, si l'on travaille salement, on passe à côté des plus belles découvertes. Or il est difficile de transvaser les gaz; si personne ne vous apprend la manière, vous risquez de perdre de longs mois à la retrouver.

Assurément, si l'*Institut des corps solides* existait, les solennelles erreurs de MM. Borel, Langevin, Perrin, Weiss et autres seigneurs de moindre importance (ils ont tous du génie, cela va sans dire) auraient eu dès l'origine les ailes coupées. Un beau matin ces messieurs se sont mis à parler des corps solides dont ils ignoraient, jusqu'au premier mot, les propriétés générales. Si Mascart vivait encore, je lui répondrais que dix années d'études patientes sur les déformations des métaux me permettent, sans craindre la plus timide protestation, de déclarer stupide d'appliquer aux solides la théorie cinétique telle que nous la connaissons.

Un séminaire de recherches et d'enseignement n'impose pas une doctrine; il crée une ambiance, un état d'âme. Il ne détruit pas l'originalité par une discipline à la prussienne; il fait seulement profiter les nouveaux venus de l'expérience des aînés. C'est une personne morale intelligente qui subsiste malgré le remplacement de ses membres.

Une direction scientifique empêche que le jeune savant se casse orgueilleusement le nez sur un mur ou s'enlise dans un marais.

On lui montre le chemin : libre à lui de le suivre!

*
* *

Les Français sont persuadés qu'ils savent tout avant d'avoir rien appris : voir toujours choisir des incapables pour commander aux autres, excuse ce travers. Ils s'inclineraient devant la supériorité intellectuelle ou professionnelle qu'ils distinguent fort bien à la longue : mais entendre journellement prôner des gens qu'ils reconnaissent à l'usage pour des imbéciles, les rend ennemis de toute discipline. J'admets donc que mes séminaires sont difficilement viables dans l'état de notre mentalité publique. Si jamais on les crée, on choisira pour les diriger des fils à papa[1]. Un de mes collègues à qui l'on demandait pourquoi je n'étais pas du conseil de perfectionnement de l'Institut électrotechnique de Toulouse, répondit ingénument : « Sa compétence lui donnerait trop d'importance ».

Il résumait notre morale Universitaire : les incapables choyés parce qu'ils ne sont pas dangereux : ils n'ont aucune importance.

Le lecteur ne me prêtera donc pas la candeur d'espérer que cette préface amènera quelque résultat pratique. Ce n'est pas une raison pour cacher la vérité : il est toujours bon de forcer les gens à la contempler, ne serait-ce que pour leur enlever l'excuse de la méconnaître. Il existe des moyens simples de supprimer le gâchis dans l'enseignement supérieur : je viens de les exposer. Maintenant faites ce qui vous plaira. Mais ne vous récriez pas quand j'énonce cet aphorisme :

« L'enseignement supérieur scientifique actuel,.... c'est du bluff et des ruines. »

Monsieur Lala, maître de conférences à la Faculté, m'a continué son amicale collaboration. Il a bien voulu relire les épreuves de ce volume et composer la très utile et commode table des matières qui le termine.

1. Il va sans dire que je décline l'avantage de diriger quoi que ce soit; je me permets des conseils et des critiques parce que je n'ai pas un décime à y gagner. Mes livres valent au factionnaire (que je suis, hélas!), d'avancer... à l'ancienneté. Je ne m'en plains pas; c'est un honneur par le temps qui court. J'ai contre moi l'administration, mais j'ai pour moi le public qui achète mes livres : c'est plus sûr et préférable à tous égards.

VISION DES FORMES

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉOMÉTRIQUE. PERSPECTIVE

Qu'il s'agisse de vision, de reproduction photographique ou de dessin, les objets matériels sont représentés *sur des plans* suivant des procédés dont l'ensemble constitue la *perspective linéaire* des architectes; ce n'est que très exceptionnellement que la surface de représentation est courbe (surface cylindrique, panoramas; surface sphérique, coupoles). Au début de ce volume, nous devons donc exposer les règles de la perspective. Nous nous bornerons à l'essentiel; au reste un cours de perspective n'est qu'un recueil d'applications; les constructions fondamentales sont assez simples et peu nombreuses pour tenir toutes dans ce chapitre.

1. Définitions et propositions générales.

1° — La *perspective linéaire* est donc l'ensemble des règles qui permettent de représenter correctement les objets sur un tableau. Pour éviter des considérations inutiles, *nous supposons le tableau plan et vertical* (dans certains cas, le tableau est horizontal : plafonds).

Repérons la position des points au moyen des axes des coordonnées X, Y, Z (fig. 1). Soient 0, h, Δ, les coordonnées de l'œil 0.

La perspective m du point M est la trace sur le tableau XCY de la droite MO qui joint le point à l'œil. Cette droite a les équations :

$$\frac{x}{X} = \frac{y-h}{Y-h} = \frac{z+\Delta}{Z+\Delta}.$$

Posons $z=0$; les coordonnées de l'image m sont :

$$x = X\frac{\Delta}{Z+\Delta}, \qquad y = h + (Y-h)\frac{\Delta}{Z+\Delta}.$$

Le problème est donc complètement résolu, puisqu'on peut toujours supposer les points à représenter donnés par leurs coordonnées X, Y, Z. Mais il est plus rapide et suffisamment précis de recourir à des constructions.

Posons $Z = 0$, nous trouvons $x = X$, $y = Y$: *les images des points du tableau sont ces points mêmes;* ce qui est évident *a priori.*

Le plan ZCX de référence s'appelle *géométral.*

2° — Perspectives de droites.

Une droite D forme un plan avec le point O (fig. 2); l'intersection de deux plans est une droite : conséquemment l'image d'une droite D est une droite *d*. La droite image passe évidemment par la trace T de la droite objet sur le tableau.

Par le point O, menons une parallèle δ à la droite D; l'opération

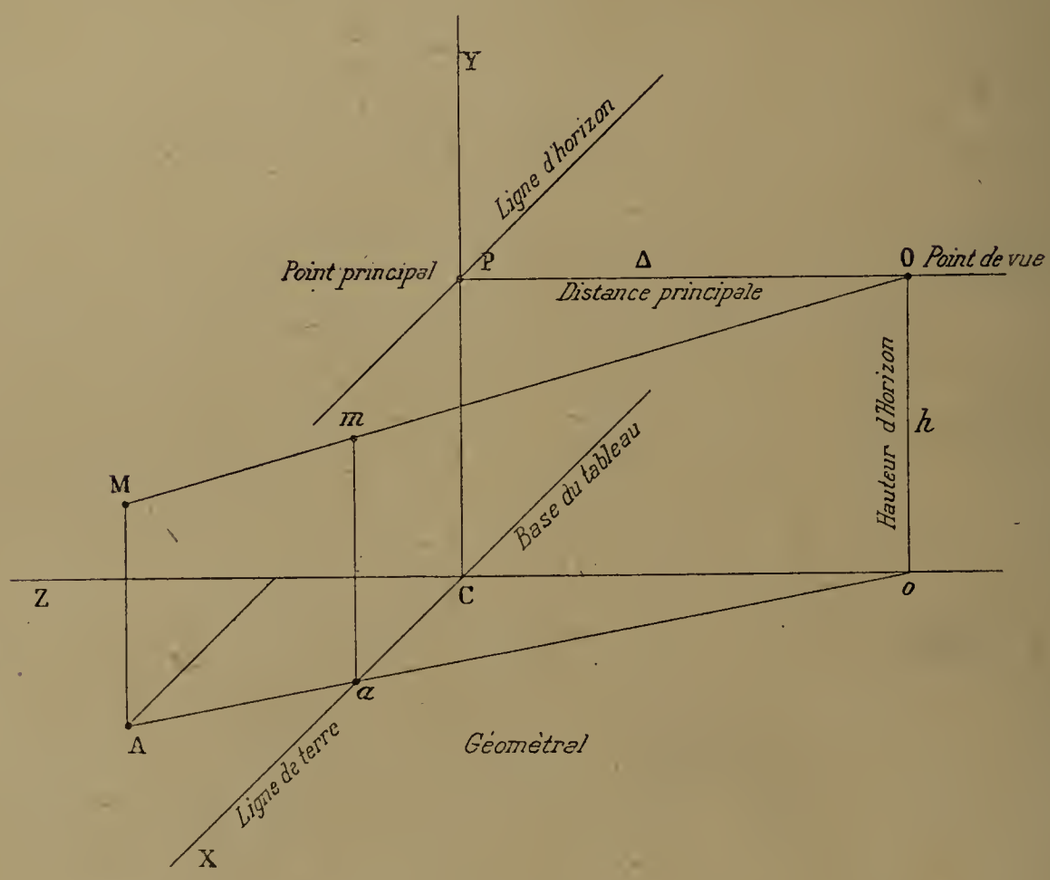


Fig. 1.

revient à joindre l'œil au point de l'infini de la droite D. La droite δ perce le tableau en un point F qu'on appelle *point de fuite* de la droite D.

Il est clair que la droite image *d* passe par le point F.

D'où le corollaire fondamental : les images de droites parallèles D, D',... sont des droites *d*, *d'*,.... (*fuyantes*) qui concourent en un point F (*de fuite*) obtenu en menant par l'œil une parallèle aux droites D, D', ...

Le point P, pied de la perpendiculaire abaissée de l'œil sur le tableau, s'appelle *point de fuite principal;* en ce point concourent les images des droites normales au tableau.

La droite OP est la *droite principale.*

$\overline{OP} = \Delta$ est la *distance principale* (fig. 1).

Si les droites D parallèles sont parallèles au tableau (*droites de front*), le point de fuite correspondant est à l'infini : les images *d* sont donc

parallèles entre elles et parallèles aux droites objets. En particulier les images de droites verticales sont les verticales du tableau.

3° — Donnons un plan P ; par l'œil menons un plan π parallèle ; il coupe le tableau suivant une ligne φ qu'on appelle *ligne de fuite* du plan P. C'est évidemment le lieu des points de fuite de toutes les droites tracées du plan. La ligne de fuite d'un plan est parallèle à la trace du plan sur le tableau.

Des plans parallèles ont même ligne de fuite ; leurs traces sur le tableau sont parallèles.

Le plan horizontal passant par l'œil s'appelle *plan d'horizon*, sa trace

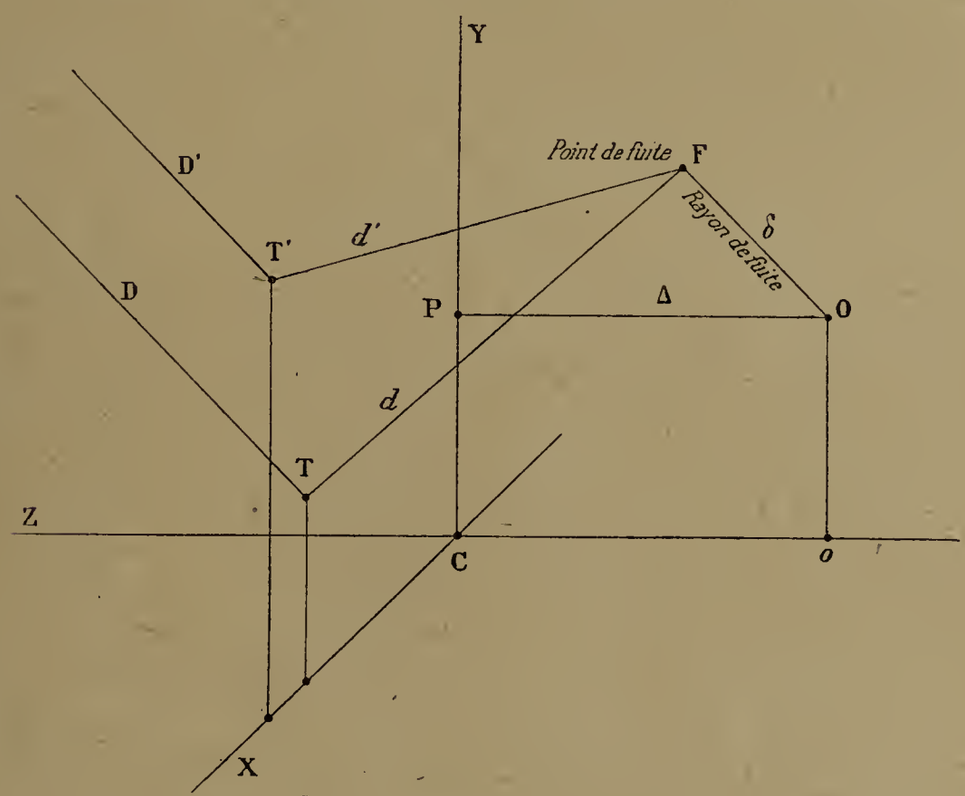


Fig. 2.

sur le tableau est l'*horizon* : c'est la ligne de fuite des plans horizontaux ; c'est donc le lieu des points de fuite de toutes les droites horizontales.

Dans le plan d'horizon, menons les droites OΠ, OΠ′, à 45° de OP (fig. 3). Les points Π, Π′, s'appellent *points de distance;* ce sont les points de fuite des horizontales qui font 45° avec le tableau.

Ils doivent leur nom à l'égalité : $\overline{OP} = \overline{P\Pi} = \overline{P\Pi'} = \Delta$.

La ligne de fuite d'un plan vertical est une verticale.

La ligne de fuite d'un plan parallèle au tableau (*plan de front*) est à l'infini.

4° — Toute figure tracée dans un plan de front a pour image une figure semblable.

Le *facteur de réduction* est $\Delta : (Z + \Delta)$;

il est plus petit que 1 si l'objet est derrière le tableau ($Z > 0$) ;

il est plus grand que 1 si l'objet est entre l'œil et le tableau ($Z < 0$).

Toute droite qui rencontre la verticale O*o* a pour image une verticale du tableau.

Mais la direction Oo est *quelconque* dans le plan de front mené par l'œil, puisqu'en définitive les seules données du problème sont le tableau, la position du point de fuite principal P et la distance Δ.

D'où le théorème : *Les droites définies par la condition que leurs images soient parallèles entre elles, passent par la droite menée par l'œil dans le plan de front de l'œil, parallèlement à la direction des images.*

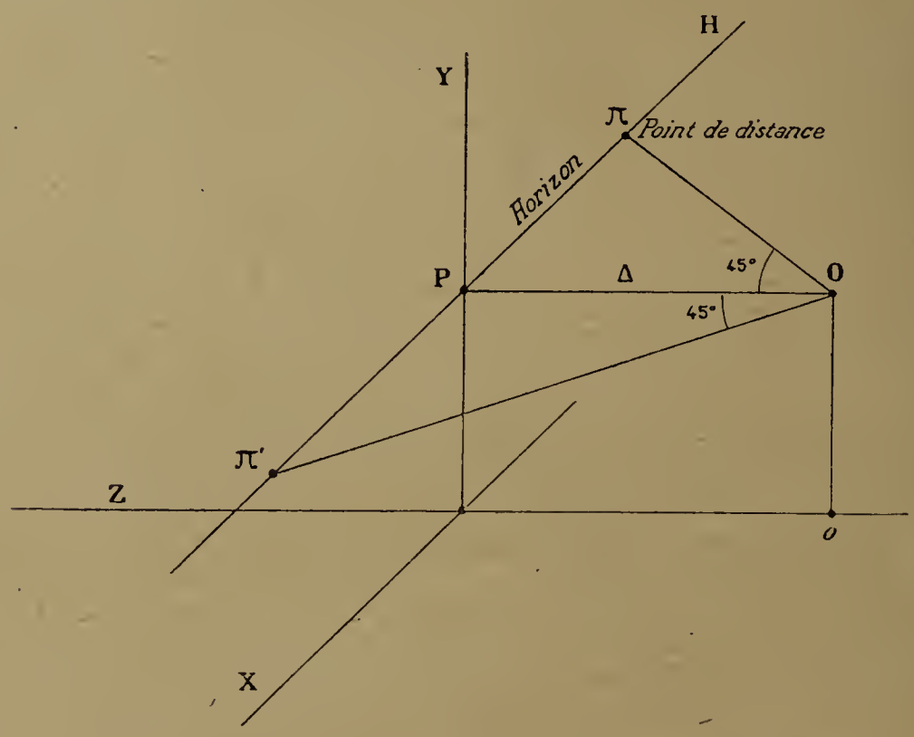


Fig. 3.

Dans le cas particulier de la droite Oo le théorème devient : les droites dont les images sont verticales, passent par la verticale menée par l'œil. C'est précisément la proposition dont nous sommes partis.

2. **Image d'un point.**

1° — Soit M le point dont nous voulons l'image (fig. 4).

Menons un plan horizontal par ce point et deux droites quelconques MD, MD', dans ce plan.

Le plan MDD' est le *géométral* du point M ; il coupe le tableau suivant la droite DD' qui est la *ligne de terre* correspondante.

Pour trouver l'image *m* du point M, construisons les images des droites MD, MD'. Pour cela, déterminons leurs points de fuite F et F', traçons FD, F'D' : le point *m* est à leur intersection.

2° — Passons à la réalisation en vraie grandeur des opérations précédentes.

Représentons d'une part (fig. 5, à gauche) le géométral et la projection horizontale du point d'horizon.

Toutes les longueurs sont en vraie grandeur.

Représentons d'autre part le tableau (fig. 5, à droite) ; les horizontales H et T sont l'horizon et la ligne de terre du géométral considéré ; leur

distance h est donnée, puisque la position du point M est connue par hypothèse.

Donc le point m est connu.

Sachant construire l'image d'un point, nous savons construire

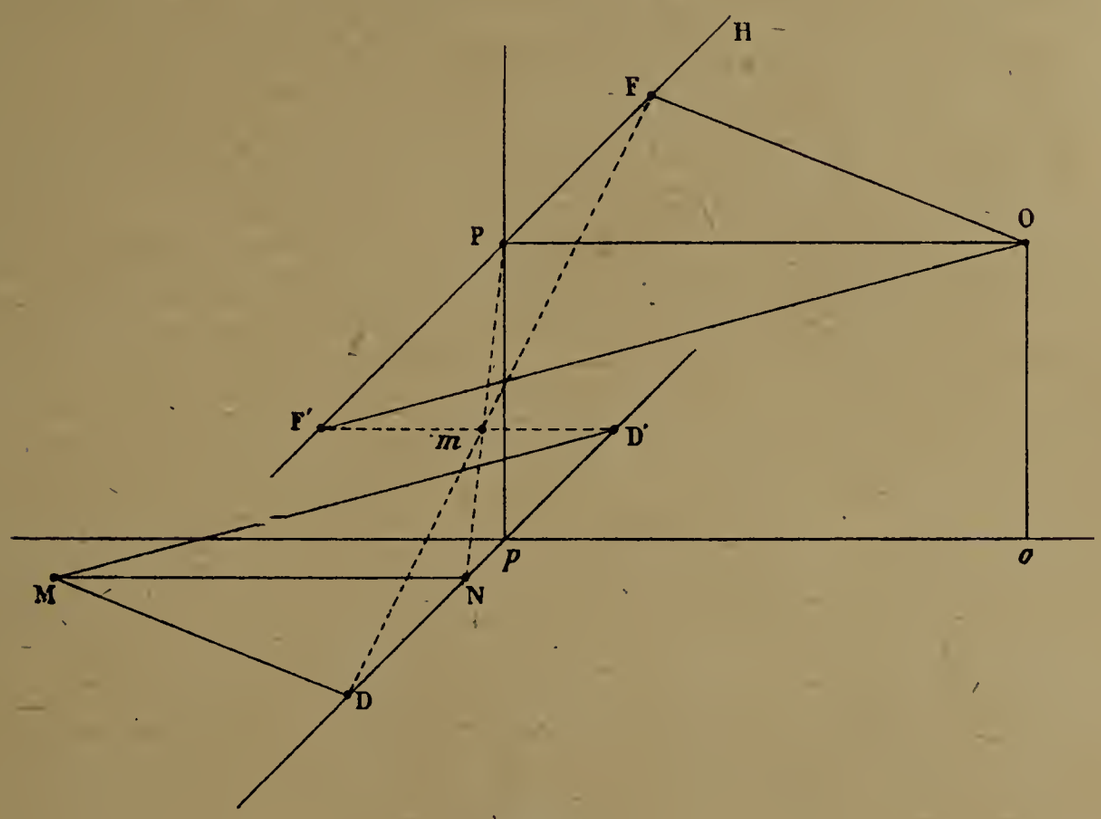


Fig. 4.

l'image d'un objet quelconque qui nous est donné par la projection horizontale de ses points (*plan*), et par la distance h de ses points

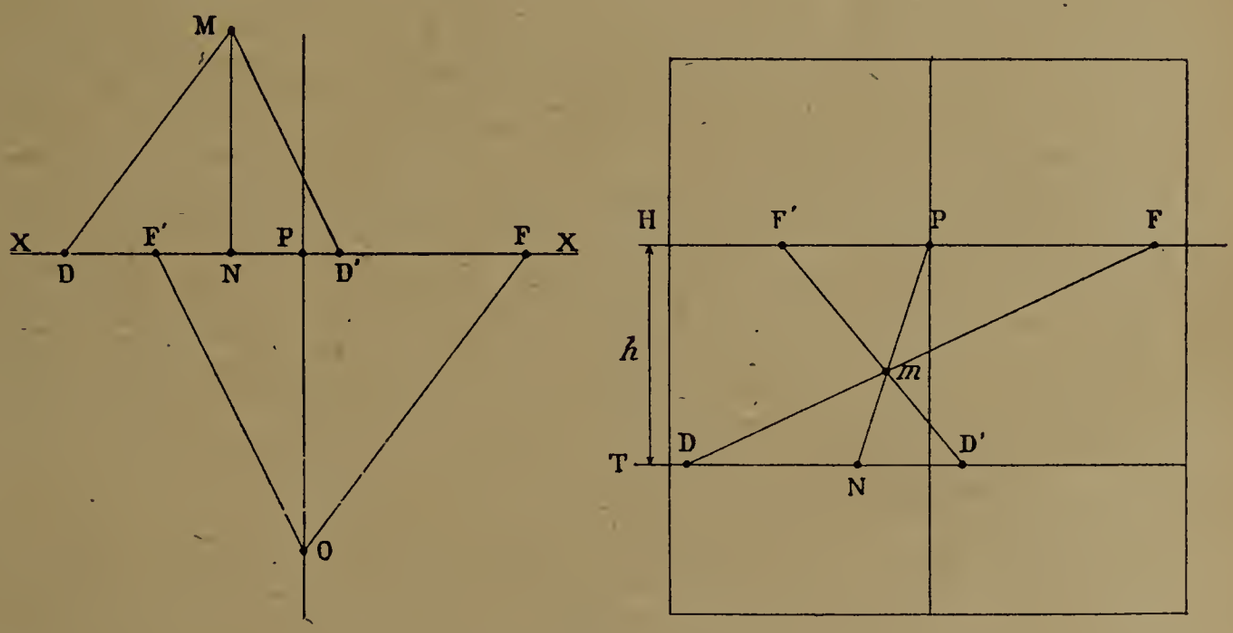


Fig. 5.

au plan d'horizon, ou, si l'on veut, par leur projection verticale (*élévation*).

3° — Simplifications.

Nous supposons les droites horizontales MD, MD', quelconques. Nous

simplifions beaucoup le dessin par un choix convenable de ces droites.

L'une des droites sera la perpendiculaire MN : elle a pour point de fuite le point P placé une fois pour toutes sur le tableau.

L'autre droite est une des horizontales à 45° du tableau; leurs points de fuite sont les *points de distance* (§ 1) que nous pouvons encore placer une fois pour toutes.

Le tracé devient extrêmement simple.

Le point M à mettre en perspective est donné par sa distance h

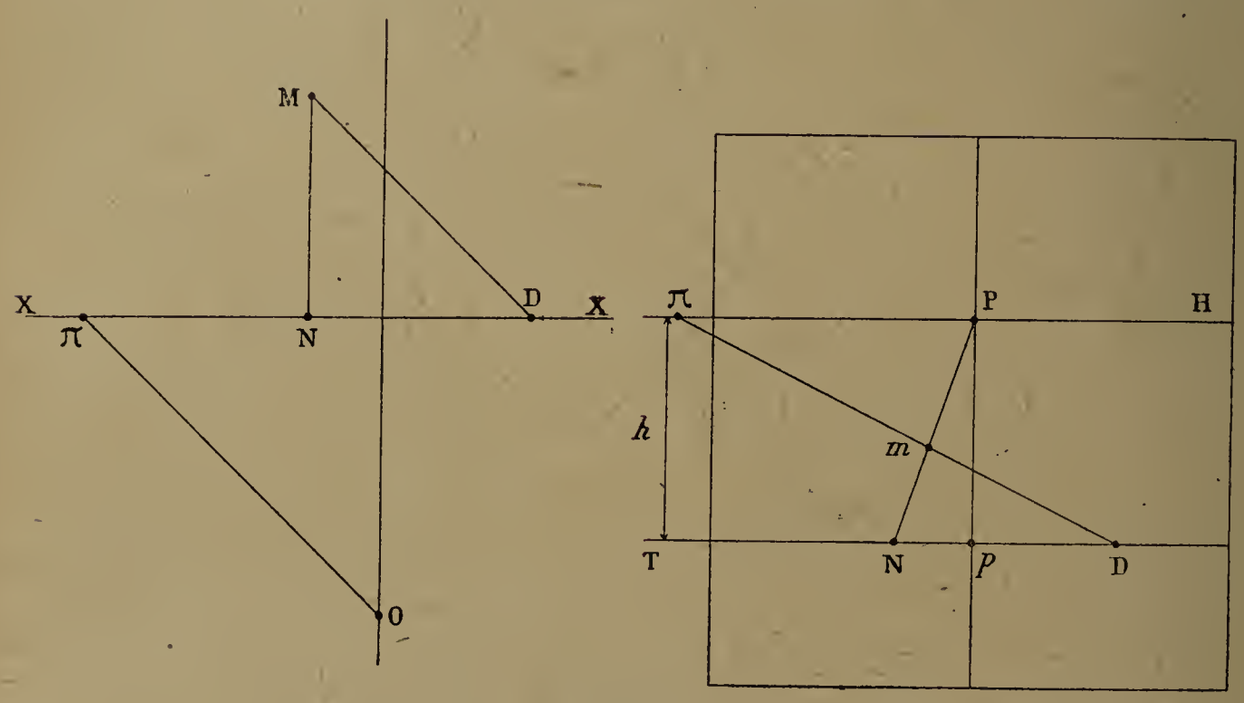


Fig. 6.

au-dessus ou au-dessous de l'horizon; d'où la ligne de terre T. Le point M se trouve à une distance $\overline{Np}$ du vertical passant par l'œil et normal au tableau; d'où la position du point N. Le point M se trouve à une distance $\overline{MN} = \overline{ND}$ du tableau : d'où la position du point D. D'où enfin la perspective m de M. La figure auxiliaire (6, à gauche), toujours commode, devient inutile.

3. Mise en perspective d'un carrelage.

1° — Le carrelage est dans un plan horizontal (*géométral*) situé à une distance h au-dessous de l'horizon. Les joints du carrelage sont des droites parallèles ou normales au tableau. L'une de celles-ci est supposée dans le vertical de l'œil (fig. 7).

Pour construire les images des droites telles que AG, reportons sur le tableau en a, b, c, . . . les points A, B, C, . . . de géométral.

Joignons au point de fuite principal.

Pour construire les images des points E, F, G, ..., appliquons la construction simplifiée précédente : joignons le point de distance Π aux points b, c, d, ..., tels qu'on ait :

$$\overline{AE} = \overline{ab}, \qquad \overline{AF} = \overline{ac}, \qquad \overline{AG} = \overline{ad}.$$

Les points d'intersection de ces droites avec aP sont les images cherchées; il ne reste plus qu'à mener des lignes de front par ces points.

2° — Nous savons donc trouver les images de carrés tracés sur le

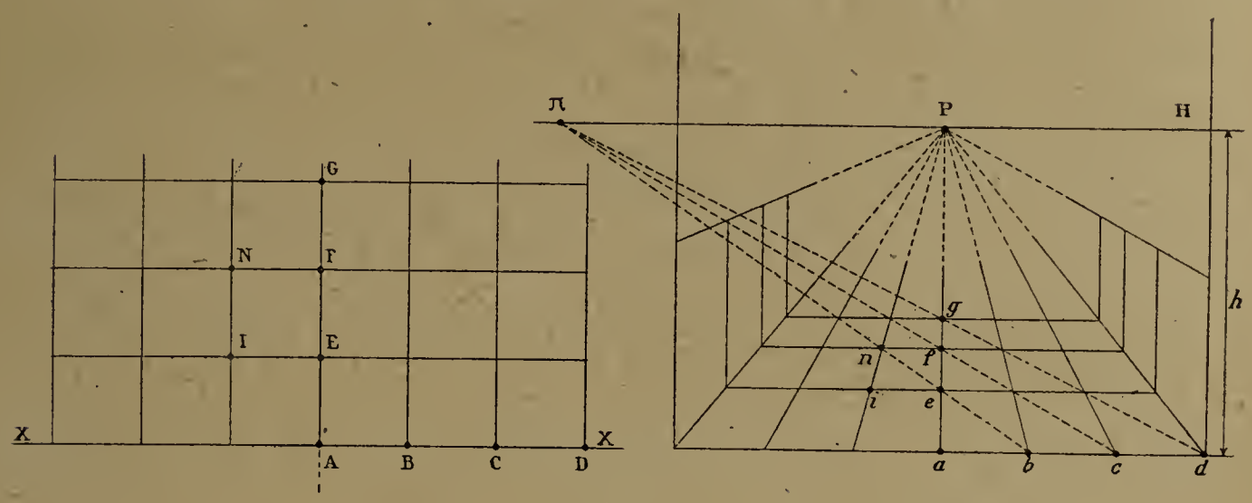


Fig. 7.

plancher d'une chambre; au moyen de ces coordonnées horizontales en perspective, nous pouvons situer une verticale.

Montrons que c'est une manière de résoudre complètement le problème de la mise en perspective d'un corps quelconque.

Remarquons d'abord qu'en vertu des formules générales (§ 1) :

$$x = Y\frac{\Delta}{Z+\Delta}, \qquad y - h = (Y - h)\frac{\Delta}{Z+\Delta},$$

le coefficient de réduction d'un segment de droite situé dans un plan de front est $\Delta : (Z + \Delta)$; il est indépendant de la direction et de la position du segment dans le plan de front considéré. La figure nous donne précisément ce coefficient de réduction. Le segment $\overline{EI}$ devient $\overline{ei}$. Si donc le point Q dont nous voulons la perspective se trouve sur une verticale projetée horizontalement en I, à une distance du plan horizontal de notre carrelage égale à k fois le segment unité $\overline{EI}$ ou AB, son image q est sur la verticale menée par i dans le tableau, à une distance $\overline{qi}$ égale à k fois le segment transformé $\overline{ei}$.

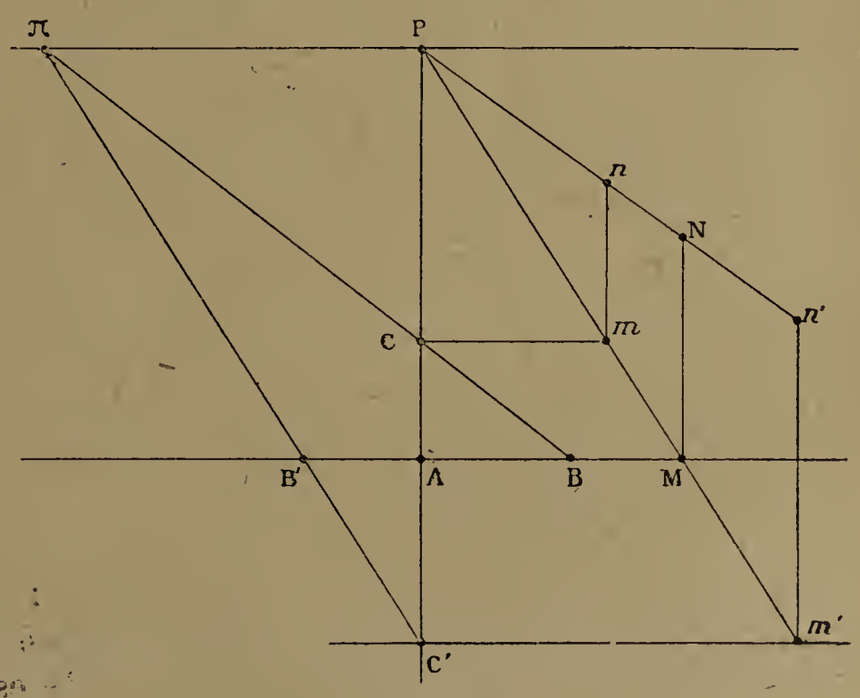


Fig. 8.

A mesure que nous éloignons un objet vertical, il diminue. Si dans le tableau il est de longueur $\overline{ab}$, il devient successivement $\overline{ei}$, $\overline{fn}$, ... quand on se place dans des plans de front situés derrière le tableau, à des distances du tableau égales à $\overline{ab}$, $2\overline{ab}$, ...

3° — Nous savons maintenant résoudre le problème fondamental du peintre : mettre en perspective des bonshommes dans une rue.

La figure 8 montre la construction :

$\overline{AB}$ est la distance à laquelle se trouve le bonhomme *derrière* le tableau; en vertu de la construction simplifiée du § 2, sa perspective est sur l'horizontale C*m*.

$\overline{MN}$ est la hauteur qu'il aurait sur le tableau; $\overline{mn}$ est sa hauteur quand il est derrière le tableau à la distance $\overline{AB}$.

On dira de même que $\overline{m'n'}$ est sa hauteur s'il est *devant* le tableau à la distance $\overline{AB'}$.

On construit ainsi aisément une échelle de proportions.

4. Perspective d'un cube.

Nous commençons par obtenir l'image de la base MNRS en utilisant le point de fuite principal P et le point de distance H, c'est-à-dire en

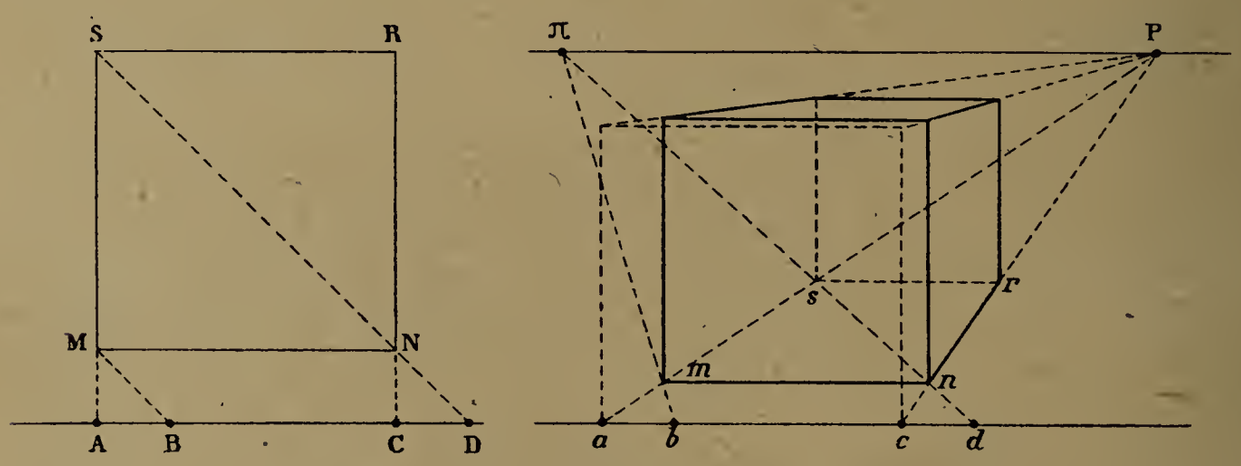


Fig. 9.

cherchant les images des horizontales RN, SM, normales à la ligne de terre, et des horizontales MB, SD, qui sont à 45° du tableau.

Les arêtes verticales du cube ont pour images des verticales. Le problème sera donc résolu si nous déterminons les images des côtés de la face supérieure qui sont normales au tableau. Pour cela traçons dans le tableau un carré ayant *ac* pour base; joignons les deux autres sommets au point P : la base supérieure du cube est déterminée par les intersections de ces droites avec les verticales passant par *m*, *n*, *r*, *s*.

5. Application de la méthode générale.

Dans bien des cas les points dont il faut construire les perspectives, sont sur deux faisceaux de droites parallèles. Il est alors avantageux

d'utiliser la méthode générale des deux points de fuite quelconques (§ 2).

Soit à mettre en perspective le carré ABCD. Déterminons les points de fuite F et G des systèmes de droites parallèles aux côtés. Reportons-

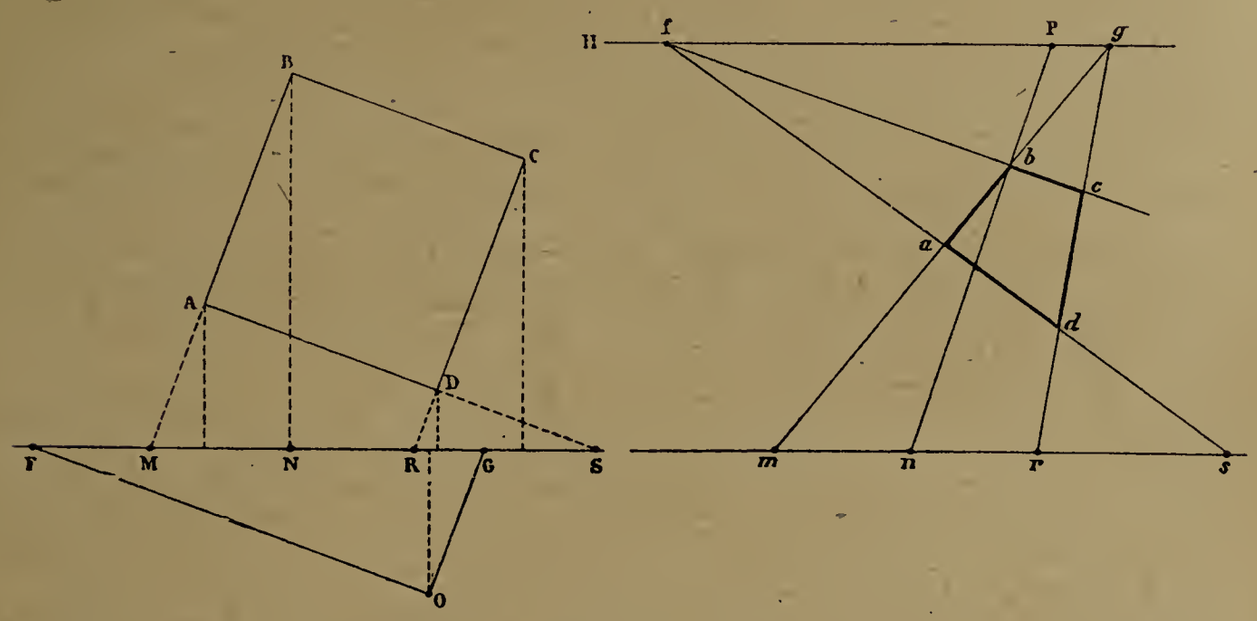


Fig. 10.

les en *f* et *g* sur le tableau. Les images des droites BM, CR, sont *gm*, *gr*. L'image de la droite AS est *fs*; d'où les points *a* et *d* images de A et de D.

Pour construire les deux autres, une difficulté se présente : la droite BC ne rencontre pas la ligne de terre dans les limites du papier. Cherchons la perspective de BN; elle est en P*n* : d'où le point *b* intersection de P*n* et de *gm*. Joignons *fb*; nous déterminons le point *c*.

La perspective diffère ici considérablement de l'objet par ce que l'œil est près du tableau, l'unité de longueur étant le côté du carré.

6. Perspective d'une courbe. Craticulation.

1° — Pour trouver la perspective d'une courbe située dans un plan horizontal, on établit un quadrillage formé de lignes de front, de droites normales au tableau, à 45° du tableau, plus généralement de droites horizontales dont on connaît le point de fuite; on reporte à l'œil la courbe sur la perspective du quadrillage.

On peut encore encadrer la courbe dans un polygone circonscrit en choisissant les côtés du polygone de manière que leur construction soit aisée.

Des lignes tangentes entre elles ont des images tangentes entre elles. Cette proposition résulte de la définition de la tangente : *une droite qui possède avec une courbe deux points comme voisins.*

La figure 11 donne un exemple de cette seconde méthode. Elle est construite avec des droites à 45° dont le point des distances est en π; le point de fuite principal est en P. On a utilisé trois tangentes.

2° — Perspective d'une circonférence de cercle.

L'image d'une circonférence est une section conique, puisque le cône *perspectif* est du second degré.

C'est une ellipse quand la circonférence est tout entière en avant du plan de front passant par l'œil.

C'est une parabole quand elle est tangente à ce plan.

C'est une hyperbole quand elle est de part et d'autre de ce plan.

Ces propositions sont vraies, que le cercle soit ou non dans un plan

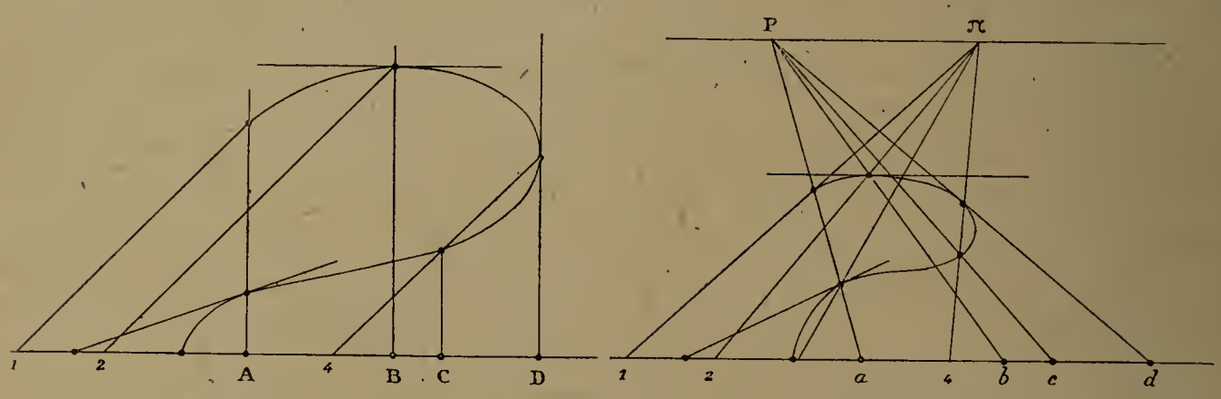


Fig. 11.

horizontal, puisqu'elles ne dépendent que de l'existence de points à l'infini, c'est-à-dire de l'existence de rayons passant par l'œil et parallèles au tableau.

3° — Perspective d'un cercle ; utilisation des propriétés des coniques.

Par le pied O de l'observateur menons des tangentes au cercle hori-

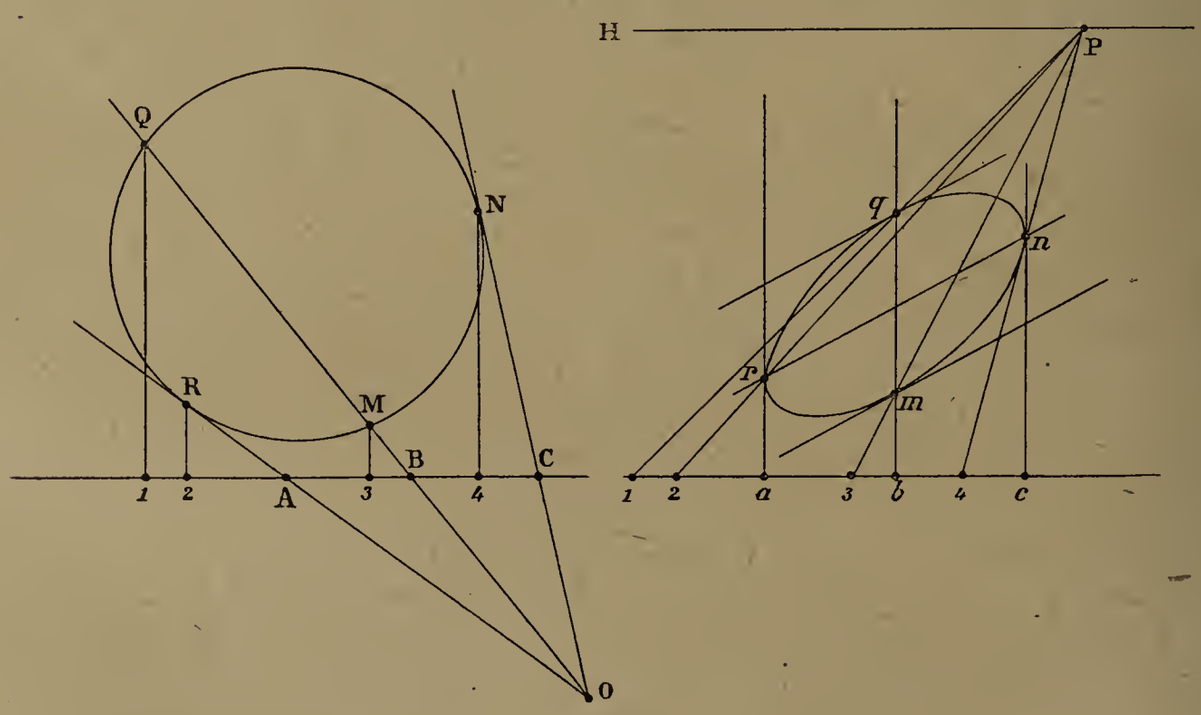


Fig. 12.

zontal à mettre en perspective. Elles rencontrent la ligne de terre en A et C. Prenons B milieu de $\overline{AC}$ et traçons OB.

Les trois lignes OA, OB, OC, ont pour images trois verticales équi-

distantes a, b, c (§ 1, 4°). Les verticales a et c sont tangentes à l'image cherchée : donc la verticale b passe par le centre de cette image.

Pour trouver les images des points M, N, Q, R, servons-nous des normales au tableau qui passent par ces points. Elles ont pour images les droites P1, P2, ... qui passent par le point de fuite principal P.

En vertu des propriétés des diamètres conjugués de l'ellipse, les tangentes en q et en m sont parallèles à rn; nous connaissons donc quatre points de l'ellipse et les tangentes en ces points; ce qui permet sans trop d'erreur de tracer la courbe à l'œil.

7. Perspective d'une colonnade, ...

L'obtention des perspectives habituelles est notablement raccourcie par le fait que les bâtiments comprennent un grand nombre de lignes

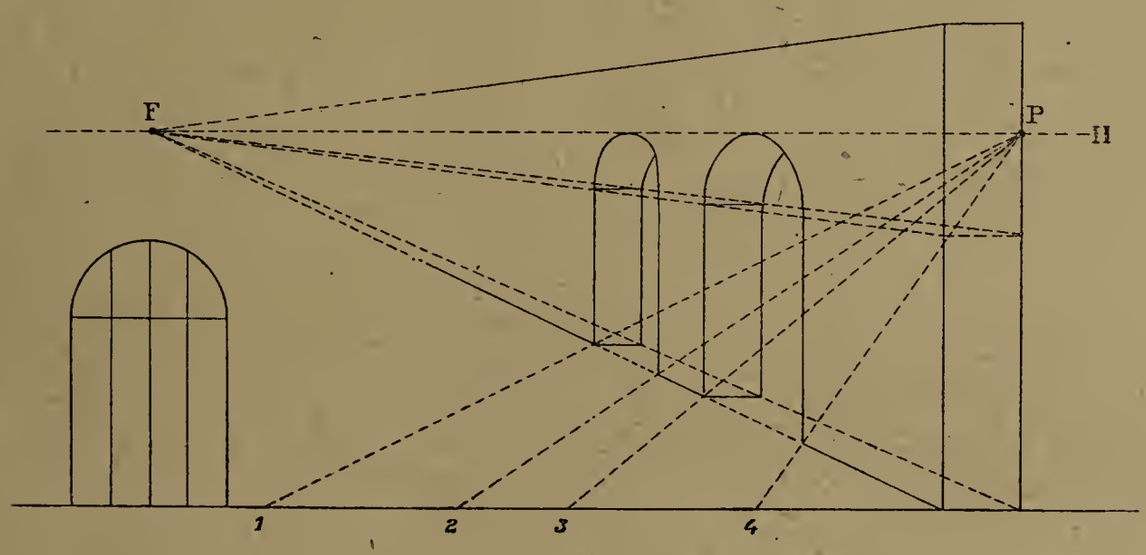


Fig. 13.

verticales et horizontales. Les images des premières sont verticales; celles des secondes s'obtiennent aisément.

Par exemple, soit à représenter en perspective une colonnade ou un mur percé de portes égales et également distantes. La base du mur, le sommet des voûtes et leurs naissances se trouvent sur des horizontales parallèles dont le point de fuite est le point F de l'horizon H. D'autre part les horizontales normales au tableau qui passent par les points homologues des portes, sont équidistantes : d'où le système des fuyantes P1, P2.

En perspective les cintres sont des ellipses; pour les tracer, on prend trois verticales équidistantes qui, avec les tangentes verticales aux bouts du diamètre horizontal, déterminent cinq points de l'ellipse (petite figure 13 à gauche).

8. Emploi de deux projections.

1° — La perspective peut être obtenue en utilisant les projections horizontale et verticale de l'objet, c'est-à-dire en usant des procédés de la Géométrie descriptive. La figure 14 représente la mise en perspective

d'une pyramide; O, *o*, sont les projections orthogonales de l'œil; T, *t*, les traces du tableau. En joignant les projections des points de l'objet aux projections de l'œil, on détermine, sur les traces du tableau, les coordonnées des traces des rayons visuels. Il suffit ensuite de les

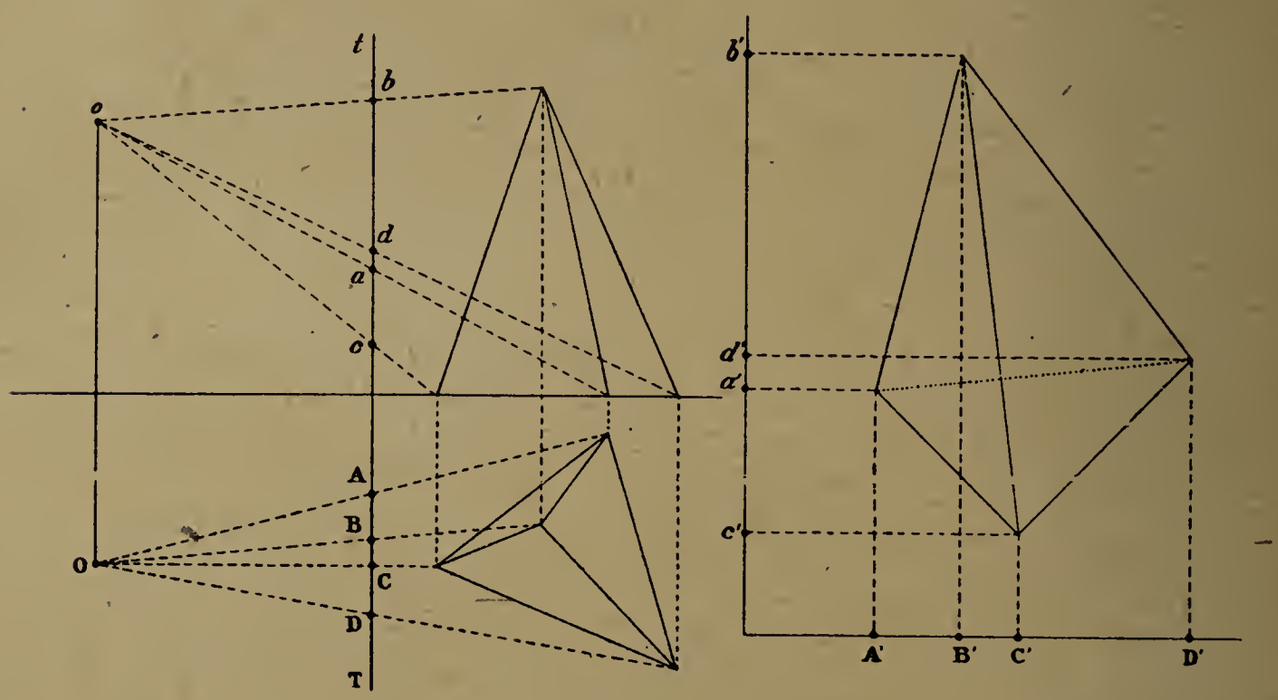


Fig. 14.

reporter sur le tableau. Dans la figure 14, la perspective a été doublée; autrement dit, les longueurs $\overline{A'B'}$, $\overline{B'C'}$, ...; $\overline{a'b'}$, $b'c'$, ... sont doubles des longueurs $\overline{AB}$, $\overline{BC}$, ...; $\overline{ab}$; bc, ... correspondantes.

Si l'on trace sur le tableau un canevas rectangulaire, le report des perspectives n'implique aucune construction; elle peut se faire à vue.

Nous supposons la pyramide posée sur un plan horizontal; les constructions sont aussi simples quand cette condition n'est pas satisfaite.

9. Perspective d'une sphère.

Le problème est intéressant parce qu'il n'est pas soluble immédiatement; nous ne savons pas en effet tout d'abord quels points mettre en perspective. Nous devons mener à la sphère un cône tangent : c'est la courbe de tangence dont nous devons chercher l'image. Le cône étant de second degré, la perspective est une ellipse; montrons que nous en pouvons déterminer quatre tangentes et les points de contact correspondants.

Traçons les projections orthogonales des contours apparents de la sphère pour des rayons normaux aux plans de projection. Au cercle F_1 correspond la droite Δ_1; à la droite Δ_2 correspond le cercle F_2.

De l'œil menons des plans tangents à la sphère normaux au plan vertical de projection. Nous déterminons ainsi par leurs projections deux points *c*, C; *d*, D; du contour apparent que nous cherchons.

De l'œil menons des plans verticaux tangents à la sphère. Nous

déterminons ainsi par leurs projections deux nouveaux points A, *a*; B, *b*; du contour apparent cherché.

Sur le tableau les tangentes aux points C, *c*; D, *d*; sont horizontales. Les tangentes aux points A, *a*; B, *b*; sont verticales.

Le problème est donc résolu par la méthode du § 8 avec une suffisante approximation.

Nous reviendrons sur la solution que les peintres donnent à ce problème.

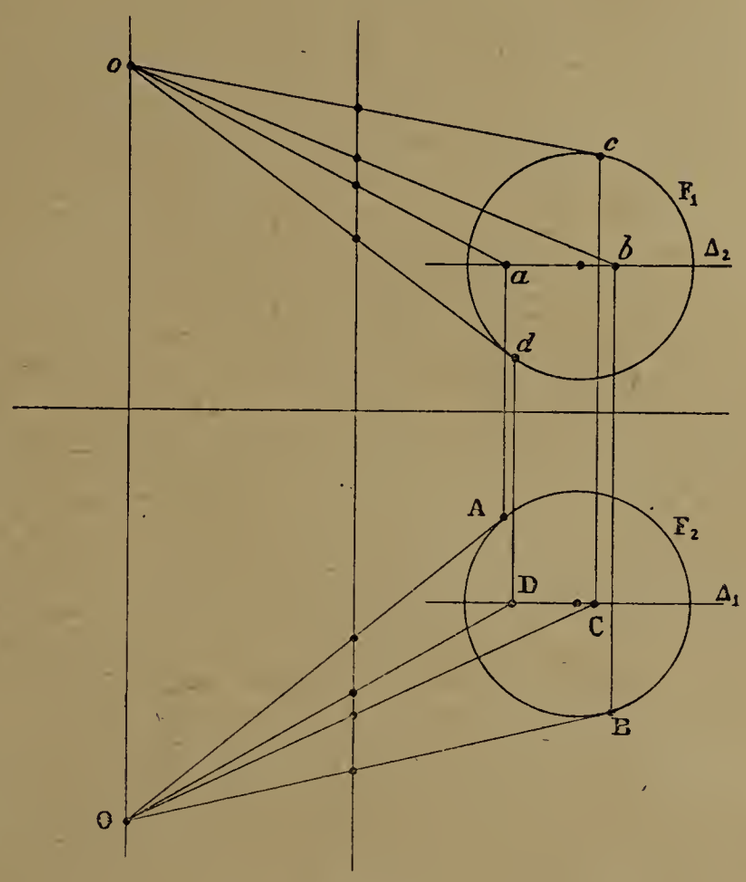


Fig. 15.

10. Rôle de la perspective dans la peinture.

1° — Il ne faut pas exagérer l'importance pratique de la perspective. Sauf les cas très rares où il est nécessaire de représenter avec exactitude un monument ou un ensemble architectural (encore la photographie permet-elle de réaliser l'image avec une grande rapidité et une parfaite exactitude), on ne demande au peintre que de ne pas se permettre des fautes trop grossières.

Léonard de Vinci conseillait purement et simplement l'usage d'un vitre sur laquelle on trace la projection cherchée, en immobilisant l'œil au moyen d'un petit trou. Ce procédé ne diffère pas du procédé photographique qui est plus court et plus exact. Qu'on fasse un petit cliché, qu'on le grandisse en le projettant avec une lentille quelconque, on aura une image aussi parfaite qu'on le désire. On peut du reste transporter le grandissement sur toile, en le grandissant encore par la méthode suffisamment exacte du *carreau* (réseaux de droites rectangulaires et équidistantes tracées sur l'épreuve et le tableau).

La mise en perspective du moindre objet exige le tracé de tant de lignes qu'elle devient absolument impossible sur un tableau. Le peintre se contente donc de représenter ce qu'il voit. Mais, c'est ici que l'étude de la perspective reprend tout son intérêt; s'il n'en connaît pas les règles, il risque de voir tout de travers. On ne voit bien que lorsqu'on sait ce qu'on doit voir. A la vérité une longue étude l'amènerait à la redécouverte des lois de la perspective : il est beaucoup plus simple de les apprendre.

2° — Voici la raison pour laquelle la rigueur perspective est inutile. Une perspective ne définit pas un objet; une infinité d'objets correspondent à la même perspective, puisque les points de ces objets ne sont assujettis qu'à se trouver sur des droites déterminées. *Une perspective n'est donc jamais fausse, tant qu'on ne précise pas ce qu'on a voulu représenter.* Par suite quand nous disons qu'une perspective est fausse, nous sous-entendons qu'on a voulu représenter un *certain* objet.

Par exemple, quelle que soit l'image qu'on nous donne d'une maison, nous ne pouvons pas en toute rigueur déclarer qu'elle est fausse. Mais si nous posons que les murs sont verticaux, que les lignes qui joignent les sommets ou les bases des fenêtres sont horizontales, etc., etc., alors seulement nous pouvons dire que la perspective est correcte ou qu'elle ne l'est pas.

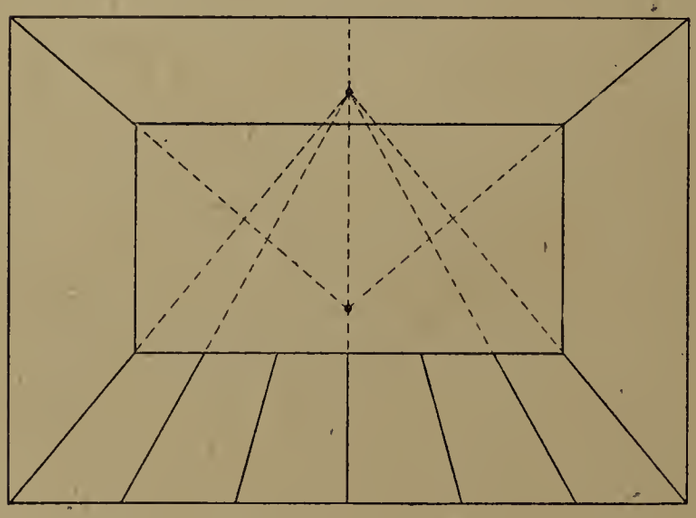


Fig. 16.

La figure 16 est censée représenter une salle s'ouvrant devant le spectateur. Il semble d'abord que la perspective soit incorrecte, puisqu'il a deux points de fuite principaux. Mais que répondre à l'artiste déclarant qu'il n'a pas voulu représenter une salle dont la superficie et les pans de murs soient rectangulaires? On reproche à Rembrandt d'avoir mis une figure trop petite au premier plan de sa *Ronde de nuit* : Rembrandt n'avait-il pas le droit de peindre une naine?

En définitive il y a toujours dans les objets représentés un arbitraire suffisant pour que seules nous blessent les fautes lourdes de perspective, à supposer que nous les reconnaissions.

11. Inconvénients d'une perspective correcte. Truquage nécessaire.

1° — Variation du point de vue.

Les singes placés devant une glace cherchent derrière la glace le singe ami qu'ils y voient; la négresse n'hésite pas à se reconnaître et à se trouver charmante. Et pourtant donnez au singe ou à la négresse le portrait d'un singe ou d'une négresse : il est habituel qu'ils n'y reconnaissent rien. C'est qu'en effet l'image dans le miroir est la reproduction du réel, *l'image dessinée est une convention.*

Pour que la perspective d'un tableau soit exacte, il doit être vu du point même qui a servi à en établir la perspective. Or il le sera d'une infinité de points fort éloignés du premier. La perspective exacte peut

devenir non seulement inutile, mais d'un effet désastreux. Le peintre se voit dans l'obligation de *truquer*.

Par exemple, une sphère réelle se projette suivant une ellipse, quand son centre n'est pas sur la normale du tableau passant par l'œil; n'empêche que le peintre trace un cercle où que soit le point de vue par rapport à la sphère. L'exactitude le conduirait à des apparences absurdes : il compte sur l'œil pour interpréter ce qu'il a fait.

Le peintre qui doit représenter une colonnade vue de front, donne à toutes les colonnes des diamètres apparents égaux : ils devraient être

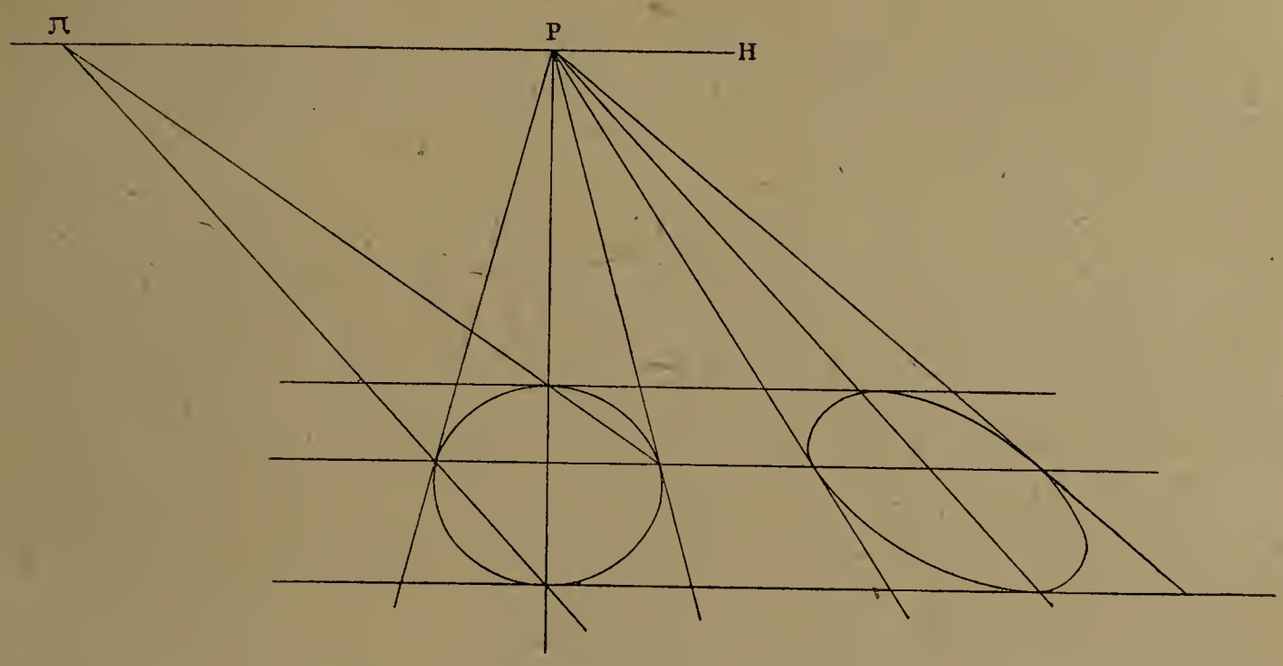


Fig. 17.

inégaux, comme le montre la figure 17 qui représente la perspective des cercles de base de deux des colonnes.

Les décors de théâtre et les plafonds qui sont des monstres sauf du point de vue, ne nous choquent que d'une manière relative : nous y mettons de la complaisance.

Un tableau vu autrement que de face est une horreur dont la photographie nous permet d'apprécier l'abomination. Nous n'en sommes pas autrement blessés, parce que nous interprétons plus que nous ne regardons.

Des gens admirent que les portraits les suivent des yeux. Le contraire serait étonnant; car l'œil dessiné de face, c'est-à-dire avec un certain rapport du noir et du blanc, est nécessairement vu de face sous quelque angle qu'on regarde la toile.

2° — Invraisemblance des perspectives correctes.

L'expérience montre que les perspectives correctes sont parfois invraisemblables et ridicules. Elle se renouvelle tous les jours au cinéma : une gigantesque locomotive de premier plan est suivie par des wagons dont le dernier semble un jouet d'enfants. La raison de cette apparence absurde vient de ce que l'expérience nous apprend à diminuer

l'importance excessive des premiers plans, à les négliger pour les ramener à leur véritable *intérêt* : ce que la photographie ne peut pas.

Le peintre corrige instinctivement cette vue objectivement exacte, subjectivement erronée, en faussant systématiquement la perspective.

On doit là-dessus d'amusantes expériences à Colardeau.

Il place devant un dessinateur une série de bouteilles semblables de formes et de volumes différents, à des distances telles qu'elles soient vues sous le même angle apparent. La photographie les montrerait égales. Le dessinateur ferait de même s'il prenait à bras tendu avec son crayon la mesure du diamètre apparent. Mais non prévenu et prié de fixer les choses *telles qu'il croit les voir*, il fait plus grosses les bouteilles plus éloignées. Les voyant plus loin, il les sait plus grosses et les représente non comme il les voit, mais conformes à l'illusion qui résulte du raisonnement.

Ainsi dans la photographie plane, l'importance des premiers plans est exagérée : elle est ramenée à sa valeur relative exacte par la photographie stéréoscopique qui, donnant la sensation de la distance, rend naturelle une combinaison d'images dont chacune est séparément inacceptable.

3° — Mêmes remarques à propos des objets élevés, une tour par exemple.

Nous la voyons comme un trapèze, rétrécie par en haut; mais nous rectifions la sensation par l'appréciation de la distance. La photographie de cette même tour prise du même point de vue, est grotesque; car sur la représentation plane non stéréoscopique rien ne permet d'estimer et de corriger les apparences réelles.

La représentation stéréoscopique n'est pas meilleure. On peut cependant la rendre excellente en inclinant l'axe du stéréoscope. On le dirige vers le haut, ce qui amène la tête en arrière; la représentation devient correcte quand la tête a précisément l'inclinaison nécessaire à l'observation directe de l'objet représenté.

Ces exemples montrent l'éducation interprétant des images perspectivement correctes; l'illusion est systématiquement acquise. Ils prouvent sans conteste le rôle subordonné que doit jouer la perspective pour que le *rendu* devienne satisfaisant : le truquage est non seulement toléré mais nécessaire.

12. Choix du point de fuite principal et de la distance principale.

1° — Choix de l'horizon et du point de fuite principal.

Précisons les conditions auxquelles l'artiste doit satisfaire.

Toutes choses égales d'ailleurs, l'angle solide du cône dont l'œil est le sommet et dont les génératrices touchent les bords de la toile (angle qui mesure le *champ*), est un maximum quand l'œil est sur la normale élevée au centre de la toile. Sous ce rapport il est donc avantageux de

mettre le point de vue sur cette normale : mais dans bien des cas on s'écarte de cette règle.

Par exemple, pour représenter l'intérieur d'une salle ou d'une église, on suppose ordinairement le spectateur sur le plancher; le point de vue est donc au-dessous du centre de la toile. Si des constructions limitent le tableau à droite et à gauche, pour éviter une symétrie déplaisante, on transporte le point de vue latéralement.

Quand une toile de grande dimension doit être accrochée au mur latéral d'une salle éclairée par des fenêtres en façade, on évite le miroitement pour l'œil du spectateur en rapprochant le point de vue des fenêtres. Le tableau est alors éclairé au mieux pour l'œil placé de manière que la perspective soit correcte.

Si l'artiste est au bord de la mer et veut représenter un effet de nuages, l'horizon sera très bas sur le tableau; s'il est sur une falaise et veut représenter des barques qui pêchent, son horizon sera très haut.

Exceptionnellement le point de fuite principal doit être pris hors du tableau quand de tous les points où le spectateur peut se trouver, il est impossible d'abaisser une perpendiculaire sur la surface à peindre.

2° — Choix de la distance principale.

A priori rien ne fixe la distance principale Δ par rapport aux dimensions de la toile; mais s'il est impossible de donner une règle précise, il semble bien que Δ doit être *supérieur* à la moitié de la plus grande dimension l du tableau. Autrement dit, un tableau long d'un mètre doit être établi de manière à être regardé *de plus* de 50 centimètres. L'autre limite reste pratiquement inférieure à l; on a donc : $l > \Delta > l : 2$.

Cela revient à dire que les rayons visuels doivent s'écarter de moins de 45° et de plus de 27° de la normale principale.

D'une part on conçoit que l'artiste ne veuille pas trop diminuer le champ de vision. D'autre part si le point de vue est trop près du tableau, l'illusion disparaît : il devient impossible que l'œil n'ait pas la conscience nette qu'il a devant lui un plan peint. Les déformations perspectives des objets vus dans des directions trop inclinées deviennent énormes; corrélativement la perspective est complètement faussée quand l'œil se déplace latéralement.

3° — Pour regarder le tableau, l'œil doit être à une distance qui ne diffère pas trop de Δ. D'où la conclusion que les musées ne devraient avoir que des cimaises; l'accrochage vertical d'une toile d'un mètre à dix mètres de hauteur est une de ces absurdités dont s'accommodent nos états démocratiques, mais dont nous devrions rougir. Du reste le mal est aussi grand quand on incline le tableau : si alors, à l'extrême rigueur, l'œil peut être sur la normale principale, il reste à une dizaine de mètres du point de vue. Ce que nous avons dit au § 11 de l'inclinaison de la tête, montre qu'il n'est pas indifférent de mettre la toile verticale et à bonne hauteur, ou inclinée et placée beaucoup trop haut. Cela

tient à ce que nous avons l'habitude de tenir la tête droite pour regarder autour de nous.

Si le tableau est vertical, son horizon doit être à peu près à la hauteur de l'œil de celui qui le regarde; si la condition est impossible à réaliser, il faut incliner le cadre.

Ce qui revient à dire qu'un tableau doit être fait pour l'endroit où on l'accrochera; ce n'est pas un passe-partout.

Ces considérations s'appliquent aux portraits. En raison de la manière dont ils sont ordinairement accrochés, l'horizon doit être choisi très bas. Il est mauvais que le peintre travaille debout devant son modèle assis; il doit travailler assis devant son modèle debout, de manière qu'une fois le portrait en place, il soit convenablement placé par rapport à ceux qui le regardent debout. Faut-il ajouter que les philistins qui ont de quoi se payer un portrait de maître, le percheront à dix pieds du sol ou le laisseront sur un chevalet, suivant la mode, et non suivant l'horizon choisi par le peintre?

Léonard de Vinci recommande au peintre de se placer les yeux à la hauteur des yeux de son modèle : cela prouve simplement que ses portraits étaient peints pour être accrochés bas.

Est-il besoin de faire observer que la *facture* doit être en relation avec la distance Δ? Si Δ est grand, on procédera par larges touches; mais un Clouet ou un Meissonier, qu'on doit regarder quasiment à la distance minima de vision distincte, sont nécessairement d'une exécution extrêmement serrée.

13. Grandeur absolue des images.

1° — Représentation grandeur nature.

Habituellement les objets représentés sont supposés *derrière* le tableau qui joue le rôle d'une fenêtre par laquelle on regarde un spectacle. Il résulte de là que l'image d'un objet placé dans un plan de front est toujours plus petite que l'objet. Représenter sur une toile un objet *en vraie grandeur*, c'est donc en réalité le faire plus grand que nature. Nous ne sommes pas choqués parce que nous plaçons la figure représentée à peu près sur le tableau même.

On est même conduit à représenter plus grand que nature pour donner l'impression que l'objet sort de la toile et s'avance vers nous.

2° — Nous pouvons représenter les objets aussi petits que nous voulons, à la condition qu'ils soient placés à une distance suffisante, c'est-à-dire que, soit par la perspective, soit par un autre moyen (*perspective aérienne*, § 266), *nous donnions l'impression* qu'ils sont à cette distance.

Par exemple, si le sol est horizontal, un homme représenté très petit doit avoir ses pieds relativement près de l'horizon. Si ses pieds sont notablement au-dessous ou au-dessus de l'horizon, il est nécessaire que nous indiquions par un procédé quelconque que le sol s'abaisse ou

s'élève en arrière de tableau; autrement dit, que nous sommes sur une montagne et l'homme dans la plaine, ou inversement.

Or il est difficile de donner à son terrain une inclinaison déterminée à l'avance. L'artiste est souvent forcé de répéter un objet que nous sommes enclins à supposer partout de la même hauteur, pour repérer ses distances sur le sol conventionnel de son tableau.

CHAPITRE II

VISION MONOCULAIRE

14. Fixation.

1° — Quoi qu'il en soit du mécanisme physique et psychologique de la vision, mécanisme dont nous connaissons la partie optique (voir mon Cours d'*Optique Géométrique*) et sur la partie psychologique duquel nous reviendrons, toujours est-il qu'il se forme à chaque instant sur la rétine une image plus ou moins nette de certains objets : c'est une *perspective* dont la rétine est le *tableau* et dont *le point de vue* dédoublé est constitué par les points nodaux de l'œil.

L'expérience nous apprend que la netteté de ce tableau, maxima au centre, diminue rapidement vers les bords. En particulier, si nous voulons étudier un objet, nous avons le soin de le *fixer :* l'opération consiste à tourner l'œil dans son orbite ou à tourner la tête de manière que l'image de l'objet *fixé* se forme sur un point de la partie centrale transparente (*fovea centralis*) de la *tache jaune* (*macula lutea*).

Fixer un point A, c'est donc amener sur ce point la *ligne visuelle*, droite qui passe par le premier point nodal de l'œil et qui est parallèle à la droite qui joint le second point nodal à la *fovea*. C'est de plus produire une accommodation telle que l'image se forme sur la rétine.

Remarquons en passant que la *ligne visuelle* ne coïncide pas avec l'*axe optique* de l'œil, c'est-à-dire avec la droite passant par les centres de courbure des surfaces supposées sphériques, limitant les divers milieux de l'œil. La fovea étant ordinairement en dehors et un peu au-dessous de cet axe, la partie extérieure de la ligne visuelle est ordinairement en dedans (du côté du nez) et un peu au-dessus de l'axe optique (du côté du front). De sorte que les yeux d'une personne qui fixe un objet éloigné, paraissent affectés d'un léger strabisme divergent.

2° — Dans son *Traité du strabisme*, Javal insiste sur l'importance de la fixation.

On ne se contente pas de diriger l'œil de manière à recevoir l'image de l'objet sur la tache jaune. Si rapprochés que soient deux points, à chaque instant il n'y en a qu'un qui soit fixé; la dimension du point de fixation ne dépasse pas la grandeur du moindre point visible. A la vérité les yeux sont extrêmement mobiles (§ 62); si l'on n'y prend pas garde,

le point fixé varie donc vite et souvent. Mais avec un peu d'exercice, on arrive à maintenir l'œil absolument immobile et dans une orientation absolument déterminée : ce qui revient à dire que la ligne visuelle est elle-même parfaitement déterminée.

On le prouve au moyen des images accidentelles (§ 252).

La fixation n'a pas seulement pour but d'amener l'image sur la partie *la plus sensible* de la rétine; dans ce cas la précision que nous avons dite, serait inutile. Il arrive même que le point de fixation n'est pas d'acuité maxima. Certains strabiques, qui ont perdu l'habitude de se servir de l'œil dévié, savent le redresser quand on couvre l'autre : ils déclarent alors voir moins nettement un objet en le fixant qu'en utilisant la vision indirecte. Ils ont donc conservé la faculté de fixer, mais le point de fixation ne correspond plus au maximum d'acuité.

L'utilité de la fixation, faible pour la vision monoculaire, n'apparaît nettement que pour la vision binoculaire; la *fovea centralis* joue alors le rôle d'origine des coordonnées dans la correspondance des points des deux rétines. Le strabisme ne se guérit aisément que si l'œil dévié a conservé la faculté de fixation.

15. Acuité visuelle.

1° — Avec quelle précision pouvons-nous distinguer les objets dans la partie la plus sensible de la rétine, c'est-à-dire quand leur image se forme près de la *fovea?*

L'expérience montre d'abord que l'*acuité visuelle* dépend de l'éclairement; nous reviendrons là-dessus.

Supposons donc l'éclairement optimum.

Pour les meilleurs yeux, une étoile double cesse d'être résolue en ses éléments, si l'intervalle des astres constituants sous-tend un angle inférieur à une minute. La distance du second point nodal de l'œil à la rétine étant prise égale à 15 millimètres, une minute correspond à une longueur d'image sur la rétine de 4,4 microns environ. Les éléments anatomiques de la rétine au voisinage de la *fovea* ont 2 μ environ de diamètre : la possibilité d'une perception distincte est donc facilement expliquée.

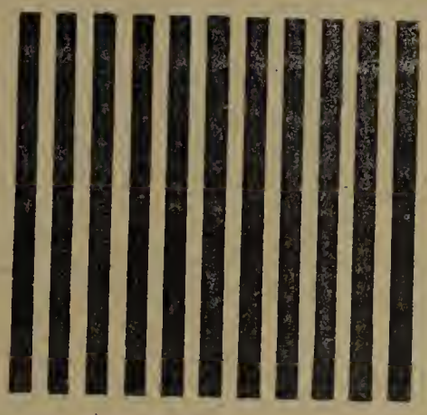


Fig. 18.

On a proposé comme test de l'acuité, la *séparation* de traits noirs et blancs, d'épaisseurs égales pour préciser. Un œil excellent les distingue encore quand la somme d'un intervalle noir et d'un intervalle blanc (période du dessin) sous-tend une minute. L'arc d'un degré vaut $17^{mm},45$ à 1 mètre, l'arc d'une minute vaut donc $0^{mm},291$. Pour voir la période du dessin sous l'angle d'une minute quand cette période est de $3^{mm},33$ (ce qui est le cas de la figure 18), il faut placer le dessin à $11^{m},44$.

Il semble que la faculté de distinguer les traits (*pouvoir de résolution*) reste la même quand varient les largeurs des noirs et des blancs, pourvu que leur somme demeure invariable.

2° — Tableaux de Snellen.

Dans la pratique oculistique on détermine l'acuité au moyen de tableaux typographiques (*dits de Snellen*) placés à 5 mètres du malade.

Par convention l'œil est d'acuité 1 s'il voit nettement et distingue entre eux des caractères ayant 5′ pour diamètre apparent; cet angle sous-tend $1^{mm},45$ à 1 mètre, $7^{mm},27$ à 5 mètres.

L'œil est d'acuité a, s'il distingue à 5 mètres des caractères qui ont $7,27 : a$ millimètres de hauteur.

L'expérience montre que la lisibilité des lettres dépend de leur forme. La définition précédente de l'acuité est vague; car il s'agit non pas seulement de voir les caractères, mais encore, pour les distinguer entre eux, d'en reconnaître le détail. Pour lire un caractère sous-tendant un angle de 5 minutes, l'œil doit séparer des points lumineux angulairement distants de moins de 5 minutes.

Un homme de $1^{m},75$ de hauteur est vu à un kilomètre sous l'angle de 6 minutes : l'œil d'acuité 1 peut en distinguer certaines parties.

Quelques oculistes ont proposé de prendre pour mesure de l'acuité, le rapport inverse des surfaces des lettres (et non pas celui de leurs hauteurs, plus généralement de leurs dimensions linéaires). Dans ce système (non usité) l'œil d'acuité a distingue à 5 mètres des caractères dont la hauteur est $7,27 : \sqrt{a}$ millimètres. La substitution d'un système à l'autre n'a aucun intérêt, puisqu'il ne s'agit que d'un mode de repérage des pouvoirs de résolution. Il n'en prendrait que si l'on avait à relier l'acuité à une autre variable.

On remplace parfois les caractères typographiques par des groupes de points de différentes grandeurs; le malade doit pouvoir les compter. L'inconvénient de ces procédés est que le malade finit par savoir le résultat par cœur.

3° — Variation de l'acuité avec l'éclairage et l'age.

L'acuité atteint une valeur quasi-limite pour un éclairement *moyen*, de l'ordre de 50 bougies-mètre. Elle n'augmente pas quand l'éclairement augmente à partir de cette valeur moyenne; elle diminue même quand vient l'éblouissement.

L'acuité diminue pour les faibles éclairements. On éclaire un texte avec une bougie; plus on éloigne la bougie, plus on doit se rapprocher pour le lire. C'est une expérience que le lecteur répétera.

L'acuité visuelle est voisine de 1, même un peu supérieure à 1 pour les enfants; elle reste telle jusqu'à quarante ans, puis décroît jusqu'au voisinage de 0,5 dans l'extrême vieillesse.

Nous supposons bien entendu l'œil sain et le mieux possible corrigé par des verres.

15 *bis*. Éléments indépendants de la rétine.

1° — Quelle que soit la constitution anatomique de la rétine, elle est sûrement formée d'éléments *indépendants :* la sensation est discontinue dans l'espace. On le démontre par l'aspect ondulé ou en damier que prennent des traits noirs et blancs, parallèles et rapprochés, quand on s'en éloigne, de manière que la limite de visibilité soit presque atteinte.

Les phénomènes s'expliquent en admettant que *nous localisons la sensation dans tout l'élément, en raison de son éclairement moyen, et indépendamment de l'endroit précis de sa surface où tombe la lumière.*

Pour fixer les idées, représentons les éléments (*cônes*) par un carrelage hexagonal (fig. 18 *bis*). Supposons qu'un trait lumineux F tombe dessus. Les éléments A sont moyennement plus éclairés que les éléments B. D'après notre hypothèse, le trait est vu comme l'indique la partie ombrée du carrelage, les éléments B paraissant plus sombres que les éléments A.

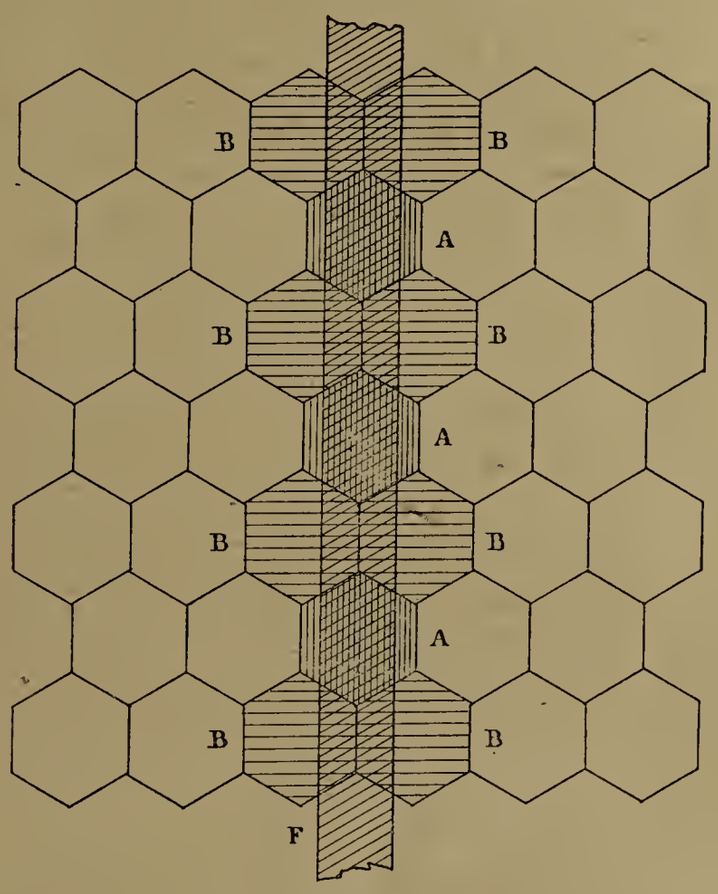


Fig. 18 *bis*.

2° — L'expérience montre que la limite de visibilité d'un trou *extrêmement petit* ne dépend que de l'*intensité* $I = \varepsilon S$, de la source ainsi constituée, et non pas des facteurs (*éclat intrinsèque* ε et *surface* S, § 104).

Peu importe en effet la dimension de l'image, dès qu'elle est assez petite pour n'agir que sur un élément indépendant de la rétine.

La visibilité est en raison inverse du carré de la distance ; preuve que seule intervient la quantité totale de lumière reçue.

Si, par l'interposition de verres, on étale la lumière, la visibilité diminue beaucoup. La lumière, alors répartie sur un certain nombre d'éléments, peut être insuffisante pour les exciter.

Pour que deux points lumineux soient vus séparés, il faut que leurs images ne se fassent pas sur des éléments indépendants contigus.

16. Punctum cæcum. Scotomes ; phénomène de Troxler.

1° — Avant d'étudier l'acuité visuelle périphérique, parlons du *punctum cæcum*. Il existe sur la rétine une portion insensible à la lumière : c'est le

lieu d'émergence du nerf optique. Ce nerf traverse les enveloppes de l'œil (la *sclérotique* tendineuse, blanche et opaque; la *choroïde* couverte de vaisseaux sanguins), et s'épanouit en une multitude de fibres nerveuses; il forme ainsi la couche interne (ou antérieure) de la rétine. Les fibres nerveuses se recourbent successivement (d'à peu près 180° à partir de la direction d'entrée dans l'œil du nerf optique) et finissent par se diriger radialement du dedans de l'œil au dehors; elles constituent alors par leur juxtaposition l'épaisseur même de la rétine. Chaque fibre est terminée par une partie dilatée mince (*bâtonnet*) ou plus grosse (*cône*) : les cônes et bâtonnets constituent donc la partie extérieure (ou postérieure) de la rétine.

On admet que les cônes et bâtonnets sont les parties sensibles de la rétine; la lumière traverse les fibres nerveuses transparentes pour les atteindre.

2° — Afin de démontrer l'existence du *punctum cæcum*, on trace sur un papier blanc deux points A et B à 7 centimètres environ l'un de l'autre.

Fig. 19.

On ferme l'œil gauche. *Avec l'œil droit*, on fixe le point A; on modifie la distance de l'œil au papier en maintenant la droite AB sensiblement horizontale. Quand elle est voisine de 20 centimètres, on cesse de voir le point B. Il réapparaît pour des distances plus grandes ou plus petites.

Le *punctum cæcum* est donc placé par rapport à la *tache jaune* du *côté nasal*, à peu près sur la même horizontale (un peu plus haut). La distance angulaire du centre de la *tache jaune* au centre du *punctum cæcum* est moyennement de 15°. L'angle apparent du *punctum cæcum* est moyennement de 6°; ce qui, pour une distance de 15 millimètres entre le second point nodal et la rétine, lui donne un diamètre linéaire de $1^{mm},6$.

Ainsi pas plus dans leur épanouissement sur la face antérieure de la rétine que dans leur groupement à l'arrivée dans l'œil, les fibres nerveuses ne sont sensibles à la lumière : l'excitation ne se produit que sur les appareils auxiliaires qui les terminent (*cônes et bâtonnets*), après traversée d'une couche insensible.

La tache aveugle est vaguement circulaire.

Pour déterminer sa forme exacte pour un de ses yeux, on ferme l'autre, et, maintenant la tête immobile par un procédé quelconque, on fixe une petite croix tracée sur du papier blanc. Puis on promène sur le papier, dans le *punctum cæcum*, un petit cylindre de papier roulé dont l'extrémité est plongée dans l'encre. On l'arrête quand elle devient visible. On noircit ainsi une région du papier *qui est l'image de la tache aveugle*.

3° — Mariotte découvrit la tache aveugle en 1666, précisément en cherchant ce qui arrive quand la lumière tombe sur le lieu d'immergence du nerf optique.

A l'étonnement de ses contemporains, le résultat fut celui qu'on a vu.

Il était ainsi démontré que nous pouvions sans nous en douter être tous aveugles d'une manière permanente pour une partie du champ de vision.

L'expérience fut répétée en 1668 devant le roi d'Angleterre Charles II qui apprit à voir ses courtisans sans tête, en se tenant à une distance convenable, en fermant un œil et fixant l'autre sur un point approprié.

Picard donna à l'expérience une forme intéressante. L'observateur se place à 3 mètres d'un mur sur lequel on fixe un papier B. Avec les deux yeux il regarde son doigt A qu'il déplace sur la normale BA au mur. Pour une distance convenable du doigt, le papier disparaît simultanément pour les deux yeux.

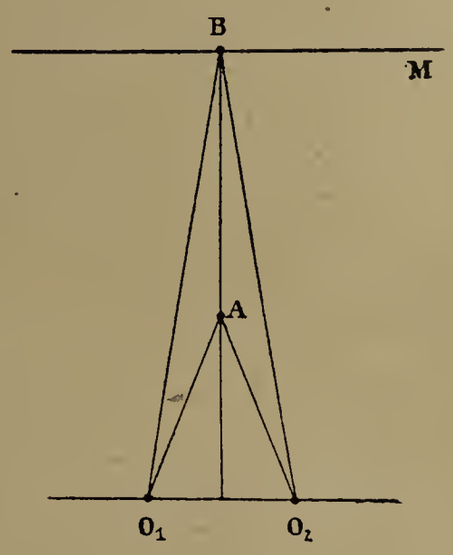


Fig. 20.

4° — Scotomes; phénomène de Troxler.

On appelle *scotomes* des taches aveugles qui existent accidentellement autre part qu'au *punctum cæcum*. L'expérience montre que de tels scotomes se produisent à tout instant *d'une manière passagère*.

Dessinons plusieurs points noirs sur du papier blanc; fixons-en un. Les autres apparaissent et disparaissent d'une manière irrégulière, le plus souvent à l'occasion d'un battement de paupières. Le trou (scotome) se remplit avec le fond général.

On observe aisément le phénomène sur un quadrillage régulier, d'un centimètre d'équidistance, par exemple. On en fixe le centre pendant une dizaine de secondes; alors la figure montre des changements perpétuels; ses diverses parties disparaissent alternativement. Chose curieuse, parfois seules disparaissent les lignes verticales, seules les horizontales. A la place d'un quadrillage, on peut utiliser un système de cercles concentriques et de rayons.

17. Champ de vision. Acuité périphérique.

1° — Pour déterminer les limites du champ de vision, on se sert du *périmètre* (fig. 21). C'est un arc métallique divisé, formant une circonférence de 30 centimètres de rayon et tournant autour d'un axe horizontal AB. Une mentonnière fixe la tête dans une position telle que l'œil soit à la hauteur du point A et au centre de l'arc. L'expérience consiste à donner à l'arc un azimut repéré par un index I sur un cercle divisé (non représenté), à fixer le point A, enfin à déterminer la grandeur

angulaire du champ de vision. Pour cela on déplace sur l'arc des petits bouts de papier de 1 cm² de surface, blancs, bleus, rouges ou verts, éclairés par la lumière du jour ou une lumière artificielle.

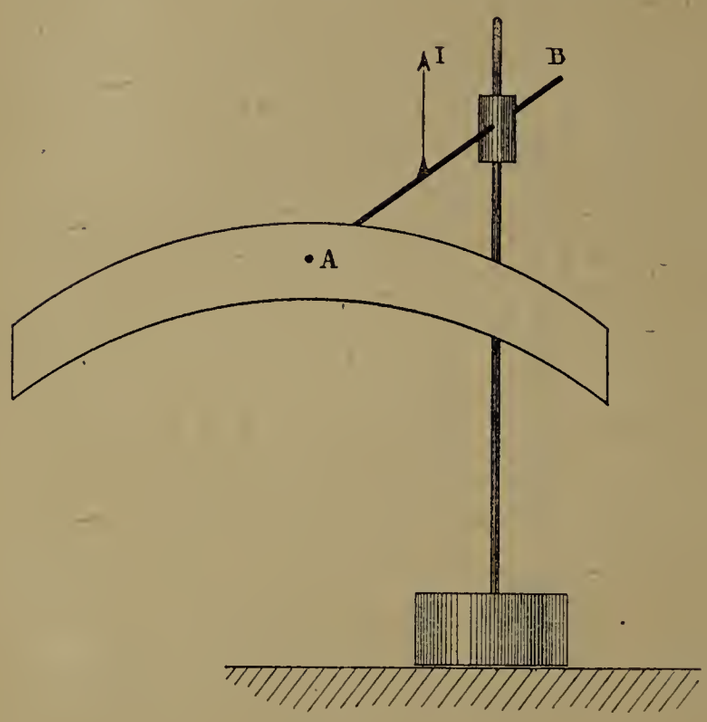


Fig. 21.

On représente le champ en coordonnées polaires. Sa grandeur en fonction des azimuts (comptés de 0 à 180° de part et d'autre de la verticale) est figurée par la longueur d'un vecteur.

La figure 22 donne un schéma des courbes obtenues. Elle se rapporte à un œil gauche. En M est la projection *extérieure* de la tache aveugle ; nous savons que cette projection est du côté temporal, à environ 15° du point A de fixation.

Avec des lumières intenses on obtient un champ considérable qui peut aller jusqu'à la limite théorique (angle que fait avec l'axe de l'œil le rayon extrême qui entre dans l'œil en raison de la forme bombée de la cornée).

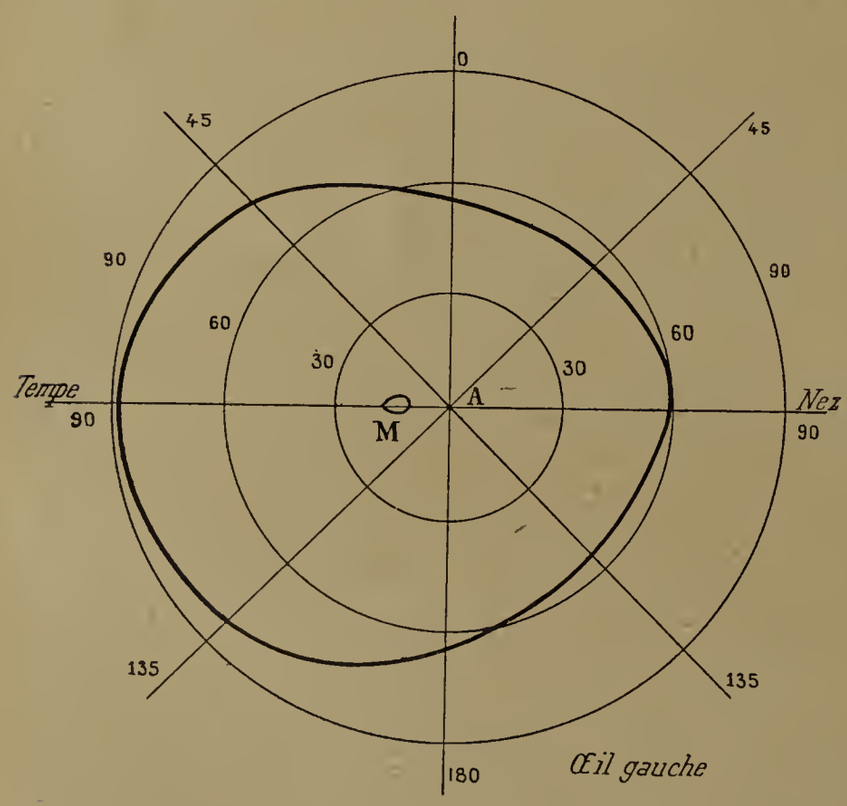


Fig. 22.

2° — Recommençons l'expérience en éclairant toujours avec la lumière blanche, mais en opérant avec des papiers colorés.

On trouve des champs qui croissent quand on remplace le vert par le rouge, le rouge par le bleu. Les couleurs complexes n'ont donc pas la même teinte en vision centrale ou en vision périphérique.

3° — L'acuité visuelle diminue rapidement à mesure que l'image se forme plus loin de la *fovea* (abstraction faite de la tache aveugle qui constitue une véritable discontinuité). Les expériences sont rendues

difficiles par l'extrême mobilité de l'œil. Généralement les auteurs fixent un point faiblement éclairé, puis produisent un éclairage intense instantané pendant la durée duquel le point de fixation n'a pas le temps de changer. Ils déterminent à quelle distance doivent être l'un de l'autre deux petits objets blancs pour être vus distincts, quand la droite qui joint à l'œil le milieu de leur distance, fait un certain angle avec la ligne visuelle.

Les résultats dus à divers expérimentateurs s'accordent seulement en ceci que l'acuité diminue rapidement à partir de la fovea.

18. Aberration de sphéricité de l'œil.

Nous supposons dans ce qui précède que les images formées sur la rétine sont parfaites, *que l'œil est sans aberrations*; nous mesurons le pouvoir de résolution de la rétine dans ces conditions optima. Il est clair que si les images des sources ponctuelles sont non plus des points, mais des cercles de diffusion, malgré que la rétine conserve le même pouvoir résolutif propre, l'acuité visuelle sera diminuée. Cherchons donc si l'œil a des aberrations de sphéricité.

1° — Astigmatisme.

L'œil n'est généralement pas de révolution : il est optiquement assimilable à l'extrémité d'un des axes d'un ellipsoïde quelconque. Nous avons longuement étudié l'astigmatisme dans le cours d'*Optique Géométrique*; nous n'y reviendrons pas.

Nous savons qu'on peut le corriger très exactement au moyen de verres cylindriques : la correction est obtenue quand l'œil voit avec une égale netteté une série de traits tracés sur du papier, se coupant en un point et dont les azimuts sont quelconques.

Dans ce qui suit nous supposons l'astigmatisme corrigé. Si alors l'œil est sans aberration pour un point P de sa ligne visuelle, il peut *avec une accommodation convenable* faire converger sur la *fovea* tous les rayons émis par le point P qui sont admis par la pupille. Au point P correspond sur la rétine une image ponctuelle.

2° — Prenons pour objet un *très petit* point lumineux (trou de fine aiguille dans du papier noir). Plaçons-le au delà du *punctum remotum* (au besoin on utilise un verre convexe), ou en deçà du *punctum proximum* (au besoin on utilise un verre concave). L'image, généralement étoilée, est formée d'un certain nombre de pseudo-images (quatre à huit). Elle est variable d'un œil à l'autre et d'une personne à l'autre, variable suivant que la cornée est propre ou lavée par un battement de paupières. De toute manière elle indique des inégalités du cristallin. Tout le monde sait que les images des étoiles et des lumières lointaines sont rayonnées.

Si l'œil est parfaitement accommodé sur le petit trou, l'image est ronde et régulière, *mais fort loin de se réduire à un point.* Force est bien de conclure que l'œil n'est pas dépourvu d'aberration sphérique; autrement dit, quelle que soit l'accommodation, on ne peut pas amener

tous les rayons issus du point lumineux à se couper simultanément en un point de la rétine.

De plus, pour une intensité grande, l'image est entourée de ce qu'Helmholtz appelle l'*auréole de rayons capillaires*, formée de lignes innombrables, extrêmement fines, de toutes les couleurs et dont les longueurs sont égales à un grand nombre de fois le diamètre du trou.

3° — On peut appliquer à l'œil les méthodes ordinaires pour déceler l'aberration.

Plaçons devant l'œil une lentille *assez convergente* et regardons un point P lumineux *éloigné*. Il nous est impossible d'accommoder dessus : les rayons émis par le point et admis par la pupille donnent une image P′ en avant de la rétine, et un cercle de diffusion sur la rétine. Pour l'œil sans aberration l'image P′ est ponctuelle ; il s'agit de savoir ce qu'il en est pour un œil ordinaire.

Par commodité utilisons une lentille plan convexe. Avec un diamant ou simplement à l'encre, traçons sur la face plane des traits rectilignes, parallèles, très voisins (à la distance l'un de l'autre d'une fraction de millimètres).

Nous supprimons ainsi, dans l'espace image de la lentille, les rayons qui se trouvent dans des plans sensiblement parallèles ; si l'on veut, nous créons des plans obscurs.

Si les rayons se coupent rigoureusement en un point P′, à ces plans obscurs correspondent en avant de la rétine d'autres plans obscurs dont les traces dans le cercle de diffusion sont des droites sensiblement parallèles.

On trouve ordinairement qu'autour de l'ombre centrale rectiligne, les ombres latérales sont courbes et tournent leur convexité vers l'ombre centrale. L'image P′ de P étant sûrement en avant de la rétine, l'œil est *sous corrigé* : les rayons centraux ont leur image plus loin du cristallin que les rayons marginaux.

L'aberration augmente naturellement à mesure que la pupille se dilate.

4° — Courbure et torsion du champ.

A supposer que l'œil donne pratiquement des images ponctuelles, pour tous les points d'un plan de front, la question se pose de savoir : d'abord si ces images ponctuelles se font simultanément sur la rétine (*courbure convenable du champ*, puisque la rétine est courbe) ; ensuite si les images sont semblables aux objets (*torsion du champ*).

Là-dessus je ne connais pas d'expériences directes.

Tscherning a fait construire un œil artificiel aussi semblable que possible à l'œil moyen. La rétine est remplacée par un hémisphère en verre dépoli ; les humeurs sont constituées par de l'eau glycérinée. Pour l'image d'un quadrillage, il trouve une déformation en *barillet* qu'il attribue à la courbure de la rétine.

Irradiation.

19. Définition.

L'*irradiation* est une conséquence immédiate des aberrations de l'œil. Elle consiste en ce que les objets lumineux sont agrandis, d'autant plus qu'ils sont plus lumineux et que les objets juxtaposés sont plus sombres.

Ainsi le contour extérieur du croissant lunaire lumineux semble appartenir à un cercle plus grand que celui qui limite le reste du disque éclairé par la *lumière cendrée* (lumière réfléchie par la Terre).

Même phénomène pendant les éclipses de Lune.

Après l'instant calculé du contact, on est quelque temps avant d'apercevoir le commencement d'une éclipse de Soleil. Puis une échancrure du disque d'une certaine étendue se manifeste tout à coup; les cornes de la portion visible sont émoussées; la partie éclipsée est toujours plus petite quelle ne devrait.

Tout le monde sait que le charbon d'une lampe à incandescence paraît beaucoup plus gros incandescent que froid. Inversement un fil fin placé devant la flamme d'une lampe disparaît : il est *mangé* par les régions éclairées qui sont de part et d'autre.

Les lignes droites paraissent interrompues. Une règle tenue entre l'œil et la flamme d'une lampe, est comme échancrée dans la portion qui couvre la flamme.

Dans une lame métallique mince, on pratique deux fentes semblables, l'une à bords unis, l'autre à bords dentelés. On les dispose devant une flamme dans un lieu obscur, de manière qu'elles soient très lumineuses.

Fig. 23.

En regardant de près, on distingue les dentelures; de loin les dentelures disparaissent. Si alors on utilise une lunette, elles reparaissent.

Galilée énonce les lois suivantes.

L'irradiation est d'autant plus grande que l'objet est plus éclatant. Ainsi Mars et Mercure qui sont plus rapprochés du Soleil que Jupiter et Saturne, par suite plus lumineux, irradient davantage.

L'irradiation croît à mesure que le fond s'obscurcit. Ainsi les étoiles observées à l'œil nu sont plus grandes la nuit qu'au crépuscule.

L'irradiation amplifie l'objet lumineux sur champ obscur; elle diminue l'objet obscur sur champ lumineux, *pourvu que ses dimensions soient suffisantes* (§ 21).

Enfin l'irradiation a d'autant plus d'effet *apparent* que l'objet est plus petit.

Le lecteur regardera les figures 23 et 24 *en se plaçant à quelque distance* (un mètre ou deux). Le carré noir lui paraîtra plus petit que le

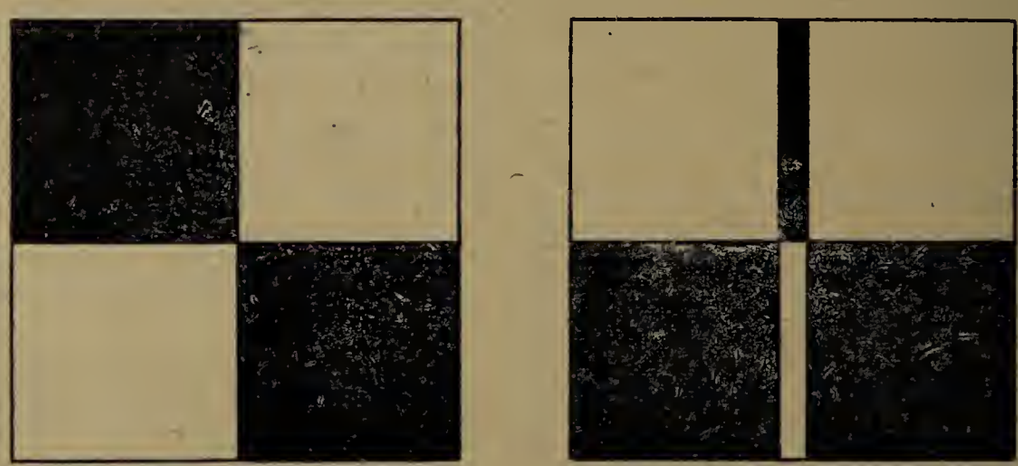


Fig. 24.

blanc, la raie noire plus étroite que la blanche. Enfin les carrés noirs ne sembleront plus adjacents par l'angle commun; les lignes qui les limitent et qui sont dans le prolongement respectif les unes des autres, sembleront avoir reculé, laissant un intervalle blanc entre les carrés.

20. **Théorie de Képler-Helmholtz.**

La théorie de Képler-Helmholtz explique l'irradiation par les aberrations de l'œil.

Comme introduction résolvons *in abstracto* le problème suivant.

1° — L'image I d'un objet lumineux serait limitée par le bord rectiligne AB, *à la supposer correcte.* La position relative de la région lumineuse et de la région obscure est précisée par la partie droite de la figure 25. Remplaçons l'image de chaque point par un cercle de rayon r, d'éclairement uniforme I_0 pour simplifier : r est petit par rapport aux dimensions de l'image I et du fond sur lequel elle se détache.

Cherchons comment se répartit la lumière.

Du point C (situé à la distance $\overline{OC} = x$ du bord AB) comme centre, décrivons une circonférence de rayon r. Le point C reçoit de la lumière de tous les points de la surface lumineuse qui sont à l'intérieur du cercle, c'est-à-dire qui appartiennent à l'aire DEFOD. On a :

$$\text{arc ECD} = \text{arc cos}(x : r), \qquad 2 \text{ surf. ECD} = r^2 \text{ arc cos}(x : r).$$

$$2 \text{ surf. OCD} = x\sqrt{r^2 - x^2}.$$

D'où enfin : $I = I_0 \left[r^2 \arccos \frac{x}{r} - x\sqrt{r^2 - x^2} \right]$;

$$\frac{dI}{dx} = -2I_0 \sqrt{r^2 - x^2}.$$

Pour $x = -r$, $I = \pi I_0 r^2 = I_1$

$x = 0$, $I = I_1 : 2$

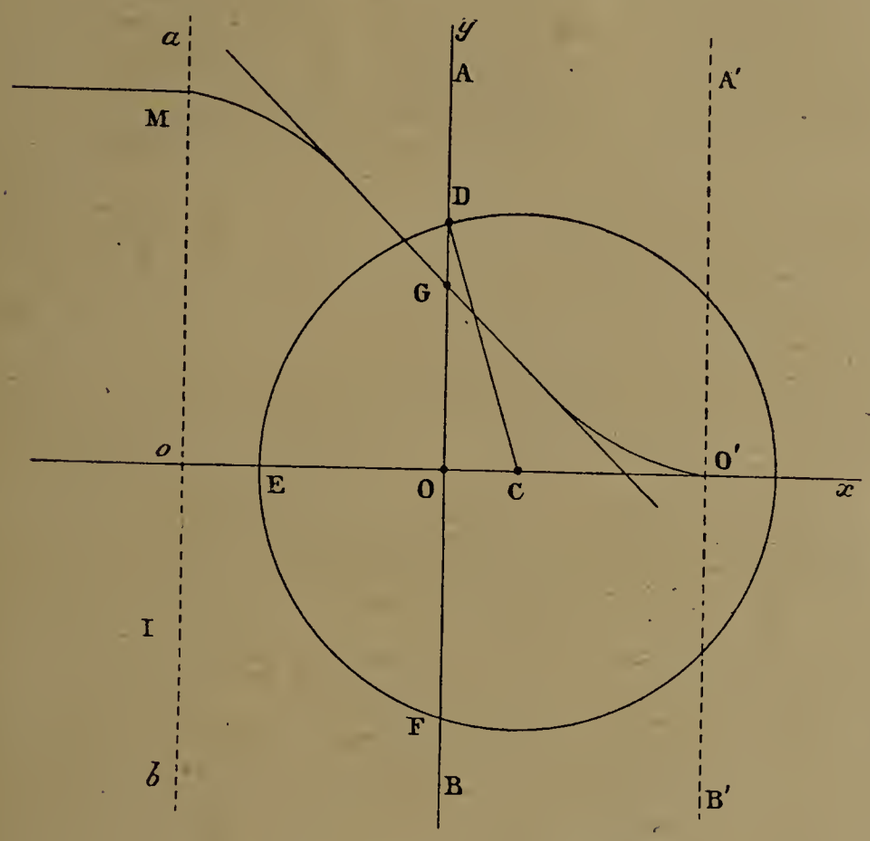
$x = r$, $I = 0$.

La tangente à la courbe représentative est horizontale pour $x = \pm r$.

Pour $x = 0$, $dI : dx = -2I_0 r = -2I_1 : \pi r$.

Ainsi d'une part la droite limitant la portion éclairée est reportée de AB en A'B' (l'image est agrandie) ; d'autre part la région où l'éclairement conserve sa valeur uniforme, est diminuée : sa limite est reportée de AB en *ab*. La lumière enlevée d'un côté se retrouve de l'autre.

2° — Appliquons les résultats précédents à une image rétinienne;



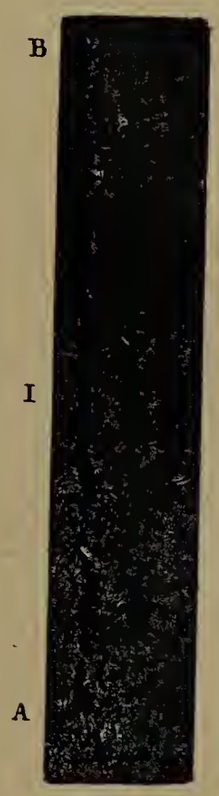


Fig. 25.

voyons ce qu'entraîne l'existence des cercles de diffusion jointe au fait (nous l'étudierons longuement au § 116 sous le nom de loi de Fechner) que *la sensation croît moins vite que l'excitation.*

Si la sensation qui correspond à l'excitation $\overline{oM}$, est grande, elle est peu diminuée par une diminution notable de l'excitation. On s'aperçoit donc à peine de la diminution d'éclairement jusqu'au bord AB; mais l'agrandissement de l'image est sensible sinon jusqu'en A'B', du moins sur une fraction de OO' qui croît à mesure que l'éclairement $\overline{oM}$ de l'objet augmente.

D'après cette théorie, l'irradiation a donc pour cause l'imperfection des images due aux aberrations de l'œil. Elle explique comment une intensité notable est nécessaire à la production du phénomène. La grandeur apparente de l'image croît avec le rayon r des cercles de diffusion.

3° — La diffraction produit des effets analogues bien qu'ayant une autre origine. L'appareil serait-il parfait au point de vue géométrique, les aberrations seraient-elles nulles, l'image d'un point n'est pas un point; sa partie centrale, la seule à considérer, est un cercle. La théorie précédente s'applique, à la différence que l'intensité n'est pas uniforme dans le cercle image. Mais si la courbe MGO′ (fig. 25) ne conserve pas la même équation, elle conserve la même allure.

Il est clair que si les phénomènes d'irradiation sont dus à l'imperfection des images, ils sont exagérés par une accommodation imparfaite : ce que l'expérience vérifie.

21. Élargissement d'un objet obscur sur fond lumineux.

1° — Montrons qu'inversement un objet obscur *très mince* est élargi quand on remplace un point image correct par un cercle (que le cercle soit dû aux aberrations ou à la diffraction, peu importe).

Soit d'abord une ligne lumineuse très mince LL. A chacun de ses

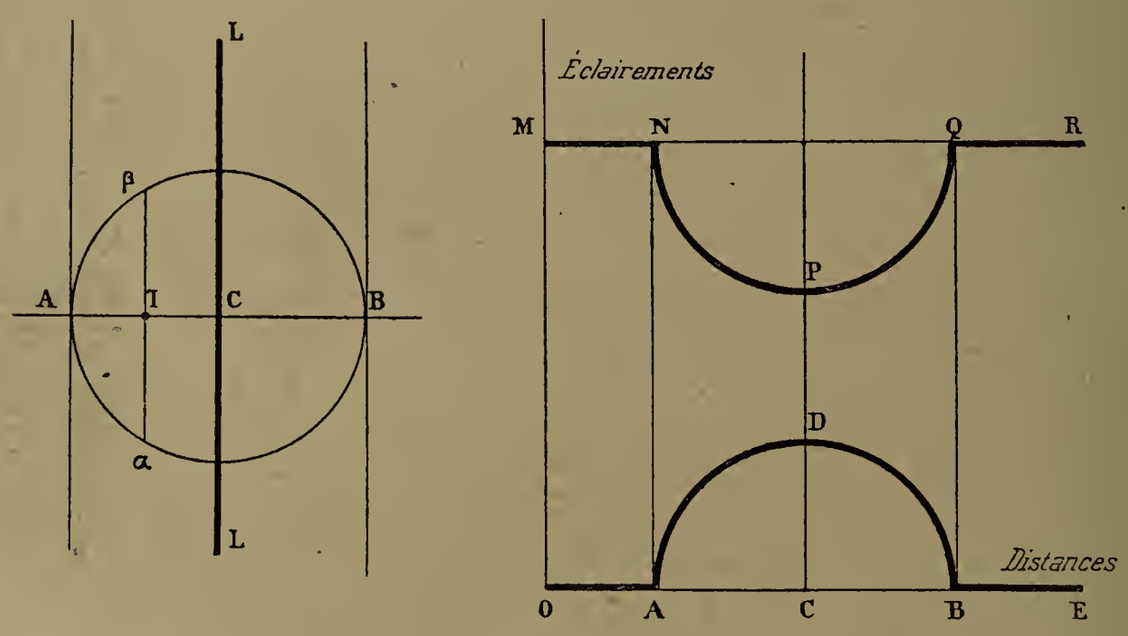


Fig. 26.

points C il faut substituer un cercle, dont pour simplifier nous poserons l'éclairement uniforme. L'éclairement a une distance $\overline{IC}$ de la ligne lumineuse est donc proportionnel à la corde $\overline{\alpha\beta}$. La courbe des éclairements est OADBE où ADB est une demi-circonférence. Nous verrons que la bande éclairée AB est nettement limitée.

Si à la place d'une ligne lumineuse sur fond noir, nous avons une ligne noire sur fond brillant, il faut retrancher une quantité de lumière

égale à celle qu'il fallait ajouter tout à l'heure : la courbe des éclairements est donc MNPQR, où NPQ est une demi-circonférence.

Si le cercle AB n'est pas d'éclairement uniforme, les conclusions sont les mêmes; seule la forme des courbes ADB, NPQ, est modifiée.

2° — En fait on attribue une épaisseur supérieure à celle qu'ils ont réellement, à des fils très fins, noirs sur fond blanc, aussi bien qu'à des fils blancs sur fond noir.

Volkmann utilise des fils de 50 μ placés à 30 centimètres de l'œil, noirs sur fond lumineux. Vu leur minceur ils semblent devoir être imperceptibles; on les distingue cependant. Une vis micrométrique permet de rapprocher deux tels fils parallèles jusqu'à ce que leur intervalle paraisse aussi large qu'eux-mêmes. Tous les observateurs trouvent un intervalle très supérieur à 50 μ, de l'ordre de 200 μ, c'est-à-dire cinq fois le diamètre des fils.

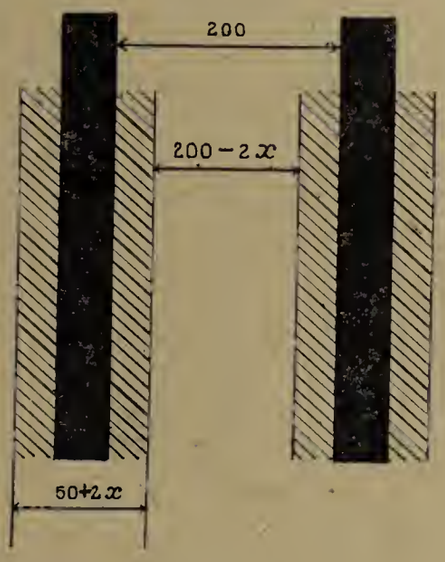


Fig. 27.

Évidemment un tel résultat suppose que les cercles de diffusion ont un diamètre supérieur à celui des fils.

Soit x la quantité dont le fil est augmenté de chaque côté : son diamètre apparent est $50 + 2x$ microns. Il doit être égal à l'espace apparent compris entre les deux fils élargis par le phénomène; c'est-à-dire à $200 - 2x$ microns. D'où $x = 37{,}5\ \mu$.

L'objet est à 30 centimètres en avant de l'œil; la distance focale postérieure de l'œil est de l'ordre de 15 centimètres; l'image sur la rétine est donc 20 fois plus petite que l'objet. On est conduit à donner au cercle de diffusion sur la rétine une grandeur de l'ordre de quelques microns (de 2 à 6 suivant les observateurs et les estimations de Volkmann).

Un diamètre de 6 microns pour le cercle rétinien correspond à une épaisseur apparente de 120 μ pour un fil d'*épaisseur négligeable* situé à 30 centimètres en avant de l'œil.

22. Théorie de Descartes-Plateau.

1° — La théorie de Descartes-Plateau explique l'irradiation par la *sensation sympathique :* l'excitation intense d'un nerf provoque la sensation des nerfs voisins; la sensation se propage d'un élément rétinien aux éléments adjacents.

Helmholtz s'élève contre cette théorie qui est au moins inutile. L'expérience journalière montre la possibilité de percevoir isolément les excitations très voisines. Quand on excite la peau en la piquant, on ne sent la douleur qu'en un point. Si la douleur locale est vive et per-

sistante, elle gagne les parties proches : mais alors faut-il parler de sensation sympathique ou de lésion généralisée?

2° — Outre les arguments qu'on verra plus loin en faveur de la théorie de Képler (§ 20), Plateau énonce une proposition exacte mais qui est la condamnation de sa propre théorie : *Deux irradiations voisines s'affaiblissent mutuellement.* C'est un autre énoncé du phénomène que nous étudions au paragraphe précédent.

Voici quelques expériences (fig. 28).

Sur un carton blanc, on peint en noir un triangle équilatéral. On l'éclaire fortement et on regarde en se plaçant à quelques mètres. Les

Fig. 28.

côtés se montrent courbes; ils présentent leur convexité à l'intérieur. Au milieu de chacun d'eux l'irradiation fait empiéter le blanc sur le noir, *tandis que les sommets noirs maintiennent en leur voisinage une grisaille apparente.*

La théorie de Plateau exigerait que les sommets fussent mangés.

On regarde la partie droite de la figure 28 en se plaçant à quelques mètres. La bande blanche du milieu paraît plus étroite que les deux autres. En effet, les bandes latérales s'élargissent au dépens du fond, ce que ne peut faire la centrale : c'est au contraire les lignes noires minces qui s'élargissent.

Helmholtz demande avec raison comment il se peut que les parties de la rétine qui se trouvent dans l'image d'une ligne noire et qui, d'après la théorie de Plateau, sont excitées des deux côtés, aient une excitation somme toute moindre que si elles ne l'étaient que d'un seul. La théorie de Plateau ne peut expliquer qu'on aperçoive un trait noir sur champ éclairé lorsque le trait est plus étroit que la largeur de l'irradiation; nous avons vu (§ 21) que la théorie de Képler s'applique fort bien à ce cas.

23. Expériences de Plateau.

Plateau utilise le dispositif représenté à gauche de la figure 24. Un des carrés opaques est mû horizontalement par une vis micrométrique : l'expérience consiste à le déplacer jusqu'à ce que les bords verti-

caux des deux carrés paraissent dans le prolongement l'un de l'autre.

Plateau trouve que l'irradiation varie avec les individus et pour le même individu avec l'état actuel des yeux. Le premier fait s'explique par une perfection de l'appareil visuel variable d'une personne à l'autre, le second par une accommodation plus ou moins bonne. Il n'y a là rien de plus extraordinaire que de voir la presbytie ou l'hypermétropie varier d'un jour ou d'une heure à l'autre : ce qui est d'observation courante.

La théorie de Képler explique aisément pourquoi l'irradiation paraît d'autant plus grande que l'objet lumineux est plus éloigné : la largeur absolue du cercle de diffusion dépend peu de la distance; sa grandeur relative augmente donc à mesure que la grandeur de l'image diminue.

Plateau trouve que l'irradiation croît en raison inverse de la distance, pourvu que celle-ci soit notable : cela revient à dire que le diamètre du cercle de diffusion devient constant à partir d'une certaine distance du point lumineux.

L'irradiation se manifeste à toute distance; ses effets sont plus faciles à mettre en évidence pour de grandes distances.

L'irradiation croît avec l'éclat de l'objet, mais tend vers une limite. Le fait est plutôt défavorable à la théorie de Plateau et favorable à celle de Képler pour laquelle l'irradiation ne peut dépasser la grandeur du cercle de diffusion.

Lorsque le champ environnant n'est pas complètement noir, l'irradiation diminue; elle s'annule pour deux champs de même éclairement : c'était à prévoir.

Quand, à l'aide de lentilles, on s'arrange de manière que l'accommodation soit parfaitement correcte, l'irradiation est rendue minima et quasi nulle. Helmholtz s'étonne avec raison que Plateau continue à soutenir sa théorie après avoir constaté ce fait qui en est la condamnation.

24. Importance de l'irradiation dans les observations astronomiques.

1° — C'est une question qui a été longuement débattue, à savoir si l'irradiation existe quand on regarde à travers un instrument d'optique. Il est nécessaire de bien préciser ce qu'on entend par là.

Que dans certains cas, l'irradiation existe, n'est pas douteux : chacun peut le démontrer par des expériences de tous les jours. Mais dans ces expériences précisément l'œil se conduit comme une lunette *de très petite ouverture;* outre les aberrations qui résultent de son imperfection, il s'y produit des phénomènes de diffraction. Dans ces conditions une aire blanche sur fond noir doit sembler plus grande que la même aire noire sur fond blanc.

Mais quand on regarde à travers une lunette, l'œil joue un rôle très différent. Il ne fonctionne plus comme lunette; il n'est plus qu'une portion d'un oculaire lié à un objectif *de grande ouverture;* les phéno-

mènes de diffraction, possibles dans le premier cas, disparaissent dans le second.

Les astronomes confondent généralement les effets des appareils et les effets de l'œil; faute de les distinguer, ils sont pour ou contre l'existence de l'irradiation suivant la valeur de leurs instruments.

Il semble pourtant que *l'irradiation astronomique n'existe pas.*

2° — Bessel et Arago ont montré que dans les bonnes lunettes le diamètre apparent d'un disque est égal à son diamètre réel.

André et Wolf font l'expérience suivante.

Dans l'étain d'une glace mince à faces parallèles, on enlève un disque circulaire qu'on observe de loin avec une lunette.

En éclairant par derrière, on voit un cercle brillant sur fond obscur; on amène un fil du réticule au contact de l'image. On place alors la lampe en avant : le cercle paraît noir sur fond brillant : *quelle que soit l'intensité de la lumière, le fil et le bord restent au contact.*

Si l'irradiation existait, le fil devrait se trouver dans la seconde expérience à une distance du bord apparent double de l'irradiation.

Foucault observait une mire lointaine formée de traits équidistants dont la largeur égale l'intervalle qui les sépare. Si l'irradiation existe telle que le veut Plateau, la résolubilité doit dépendre au premier chef de l'éclairement de la mire : nous savons qu'elle dépend uniquement de l'ouverture de l'objectif, pour un grossissement suffisant de l'oculaire, bien entendu (voir mon Cours sur la *Construction,... des instruments de mesure et d'observation*).

Dans les instruments imparfaits, les aberrations, les défauts de mise au point, l'insuffisance de l'ouverture produisent des phénomènes analogues à l'irradiation physiologique *qui est due aux mêmes causes mais affectant l'instrument visuel.*

25. Ligament noir.

1° — On sait de quelle importance astronomique est *en théorie* le passage de Vénus sur le Soleil; cependant il n'a jamais donné que des résultats médiocres, en raison de la difficulté de déterminer avec précision l'instant des contacts.

La planète apparaît en noir sur le disque solaire; il s'agit de déterminer l'heure où son contour est tangent *intérieurement* au contour solaire (figure schématique 29, en haut).

Une goutte noire apparaît entre la planète et le bord du Soleil au moment du premier contact interne, un ligament obscur avant le deuxième contact. On les attribue à l'irradiation.

Suivant cette théorie, la lumière solaire empiète sur le disque de la planète et déborde extérieurement, de sorte que ses limites sont non pas les circonférences en trait plein, mais les circonférences en traits interrompus (fig. 29, à droite). Au moment où le contact réel s'effectue, l'irradiation cesse de se produire aux points de contact; d'où la brusque

disparition ou la brusque production du ligament, suivant qu'il s'agit du premier contact interne ou du second (position 1 et 2 dans la figure 29, en haut).

Si le phénomène est indépendant des instruments utilisés, il devient le meilleur soutien de la théorie de Plateau. Wolf et André ont montré

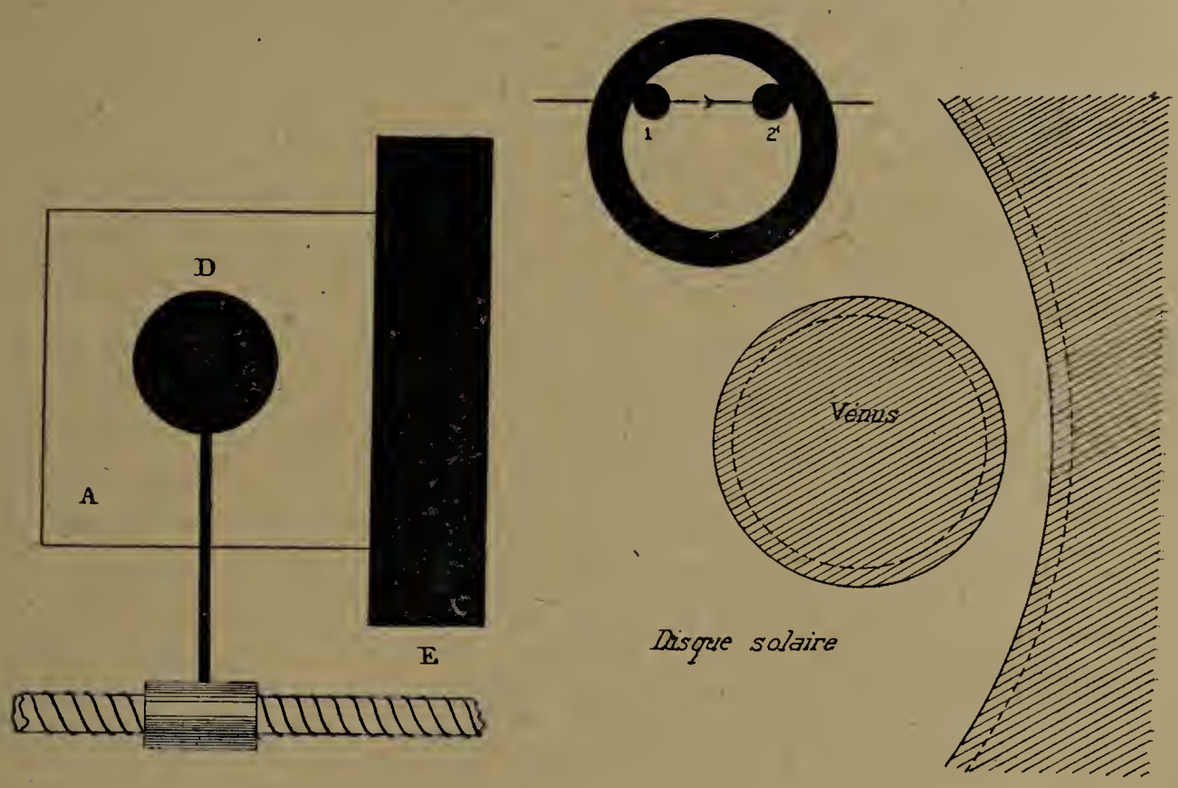


Fig. 29.

que sa manifestation dépend de l'instrument : l'instant de l'apparition du ligament noir n'est pas celui du contact réel des bords des deux astres.

2° — André et Wolf utilisent l'appareil suivant.

Le chariot d'une machine à diviser porte un disque D figurant la planète. Il se meut devant un papier calque fortement éclairé par un réflecteur parabolique au foyer duquel est une lampe modérateur : cette aire lumineuse A figure la partie du disque solaire voisine du bord.

Le fond obscur du ciel est représenté par l'écran E.

On regarde de loin avec une lunette. L'expérience consiste à déplacer lentement le disque et à l'arrêter au moment du contact apparent; on détermine l'écart de la position ainsi déterminée avec la position de contact réel (indiquée par un contact électrique).

Voici les conclusions du mémoire.

Un instrument bien dépouillé d'aberrations et de 20 centimètres d'ouverture au moins, permet, par temps calme, d'apprécier le contact sans erreur sensible. L'erreur augmente vite quand l'ouverture diminue.

L'aberration assombrit le filet lumineux qui sépare le disque de l'écran; son effet agit en sens inverse de l'ouverture.

Le grossissement de l'oculaire a une influence négligeable.

Ainsi le phénomène qu'on attribuait à l'irradiation, a une tout autre cause. Le ligament noir est introduit par les défauts de l'objectif et par l'insuffisance de l'ouverture.

Champ visuel monoculaire.

26. Topographie du champ visuel monoculaire.

Sans nous soucier pour l'instant de la manière dont nous avons acquis l'usage du champ visuel monoculaire, cherchons à fixer la précision avec laquelle nous pouvons, d'après l'image sur la rétine, conclure la distribution des points extérieurs.

La vision monoculaire ne fournissant aucune idée de la distance, supposons que les points vus sont tous à peu près à la même distance; pour préciser plaçons-les sur un tableau quasi normal à la ligne allant du centre de l'œil au centre du tableau. Rappelons que *fixer un point*, c'est orienter l'œil de manière que son image se fasse sur la *fovea* qui est le centre de la *tache jaune* et qui appartient à la région la plus sensible de la rétine.

1° — Direction extérieure de la ligne visuelle.

Grâce aux sensations qui nous font connaître la position de la tête et du corps par rapport aux objets environnants, et la position du globe de l'œil dans la tête, nous savons très exactement dans quelle direction par rapport à notre corps se trouve *la ligne visuelle*, c'est-à-dire la droite qui passe par le premier point nodal de l'œil et qui est parallèle à la droite menée par le second point nodal et par la *fovea*. La preuve en est que, sans prendre le temps de regarder notre doigt, nous le portons précisément là où est le point visé (bien entendu lorsqu'il est suffisamment voisin du corps pour que nous puissions l'atteindre).

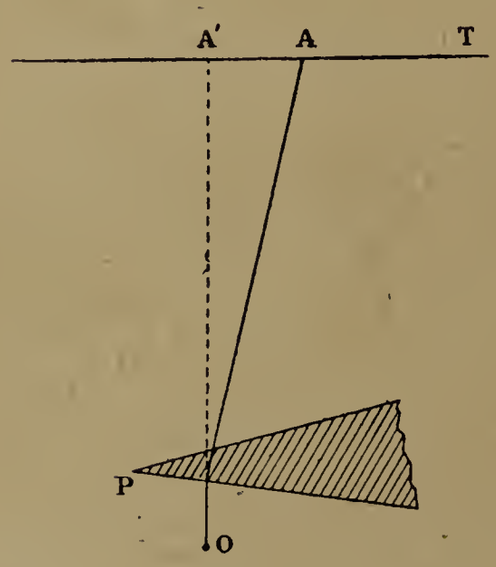


Fig. 30.

Comme il s'agit là d'une éducation acquise dans les conditions habituelles d'exercice de nos sens, si nous modifions ces conditions, nous nous trompons.

Devant l'œil O plaçons un prisme P d'une dizaine de degrés. L'objet A est vu en A' sur le tableau T. Quand on veut le saisir *rapidement*, on porte la main trop à gauche. La raison en est simple : obéissant à l'ensemble des sensations, c'est non pas en A mais en A' qu'on induit son existence.

2° — Appréciation des longueurs.

A une distance de l'œil de l'ordre du mètre, on dispose trois fils tendus

verticalement par des poids. On les déplace horizontalement de manière que la distance des fils 1 et 2 égale celle des fils 2 et 3. Les distances variant de 1 à 25 centimètres, l'erreur est de l'ordre du centième des distances à comparer (conformément à la loi de Fechner, § 116).

On effectue cette expérience généralisée chaque fois qu'on fait une mesure de longueur. L'opération consiste toujours à évaluer la position relative d'un trait par rapport à deux traits parallèles au premier. Comme il ne s'agit plus ici de rendre égaux les intervalles, comme on sent déterminer le rapport des distances, la précision est inférieure au centième. Pourvu que les traits de repères ne soient pas trop rapprochés, l'estimation se fait toujours sans erreur au dixième.

L'expérience montre que la comparaison des distances verticales est moins précise que celle des distances horizontales (dans la première des expériences précédentes, il s'agit de distances horizontales, puisque les droites à rendre équidistantes sont verticales).

On divise plus inexactement en deux parties égales un segment de droite verticale qu'un segment de droite horizontale.

On compare difficilement une longueur verticale et une longueur horizontale. Nous avons tendance à considérer les verticales comme plus longues que les horizontales de même longueur. Sur un papier tenu perpendiculairement à la ligne visuelle, traçons de sentiment un carré dont les côtés soient verticaux et horizontaux : une rotation de 90° donne sans discussion possible une figure qui ne saurait passer pour un carré.

3° — Estimation du parallélisme et de la normalité.

Nous reconnaissons l'existence ou la non-existence du parallélisme avec beaucoup de précision. L'appréciation est plus exacte pour des lignes horizontales que pour des verticales.

Posons que l'angle droit a l'un de ses côtés horizontal. Les angles 1 et 3 paraissent généralement obtus pour l'œil droit; par suite les angles 2 et 4 lui paraissent aigus. C'est l'inverse pour l'œil gauche (fig. 31).

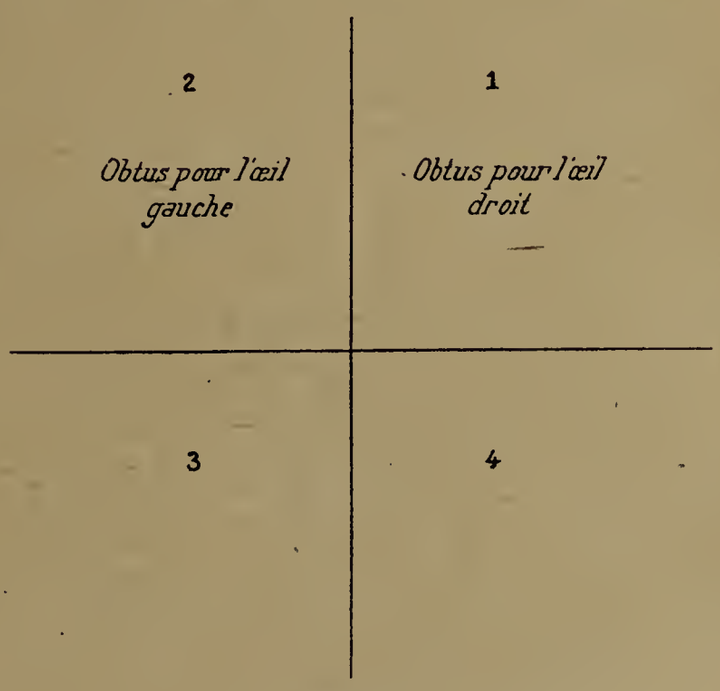


Fig. 31.

Quand on cherche à mener de sentiment une perpendiculaire sur une horizontale, *en regardant avec l'œil droit*, on fait donc aigus les angles 1 et 3; l'erreur est de l'ordre de 1 à 2° pour des yeux exercés.

L'angle au sommet d'un triangle équilatéral paraît toujours plus aigu

que les angles de base; autrement dit, la base horizontale paraît plus petite que les côtés inclinés.

26 *bis*. **Erreurs des pointés.**

Rapprochons des expériences précédentes les *pointés* que les physiciens, astronomes, topographes..., ont constamment à faire.

Ils se classent en trois catégories; pointés de *prolongement*, de *contact*, de *bissection*.

La figure montre l'ensemble des cas usuels.

On peut avoir à mettre dans le prolongement l'un de l'autre deux

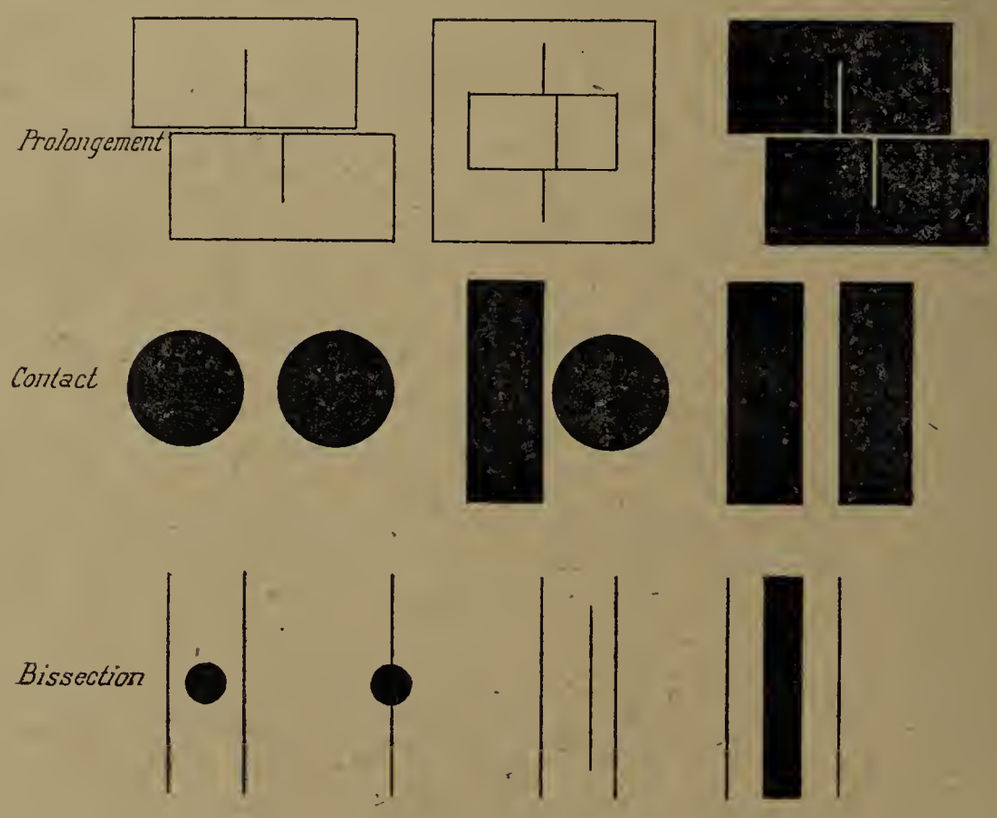


Fig. 31 *bis*.

traits noirs sur fond blanc, ou deux traits brillants sur fond obscur; les traits peuvent être plus ou moins larges. L'un des traits peut venir remplir le vide laissé par les deux bouts de l'autre.

On peut avoir à mettre en contact des cercles égaux ou inégaux; à la limite, l'un d'eux ou les deux deviennent des traits plus ou moins larges.

On peut faire bissecter par un point noir ou brillant, gros ou petit, un trait ou l'intervalle de deux traits; on peut faire bissecter l'intervalle de deux traits par un trait plus ou moins large.

La méthode consiste à placer la partie mobile sur une machine à diviser dont on manœuvre de loin la vis avec une corde sans fin passant sur une poulie. L'observateur se met à 10 mètres par exemple; il ajuste de son mieux la partie mobile; un aide fait la lecture de position. On transforme l'erreur linéaire en angle ayant l'œil de l'observateur pour sommet.

Les erreurs varient beaucoup avec les conditions de l'expérience, avec l'observateur, avec l'état actuel de son œil. Elles ont environ

de 10″ à 20″ comme moyenne, ce qui correspond à une erreur de position de 0,5 à 1 millimètre environ à 10 mètres.

27. Muscles de l'œil.

La figure 32 représente schématiquement les muscles de l'œil.

Ils s'insèrent sur le globe de l'œil dont AA est l'axe de révolution.

Les muscles droit interne DI et droit externe DE font tourner l'œil autour d'un axe vertical, normal au plan de la figure.

Les muscles droit supérieur DS et droit inférieur (caché) le font tourner autour de l'axe CC à 70° environ de l'axe de révolution.

Enfin les muscles obliques supérieur OS et inférieur (caché) le font tourner autour de l'axe BB à 35° de l'axe de révolution.

Les actions combinées de ces six muscles suffisent à amener l'axe de l'œil, par conséquent la ligne visuelle, dans une direction quelconque, et simultanément à faire tourner l'œil autour de son axe.

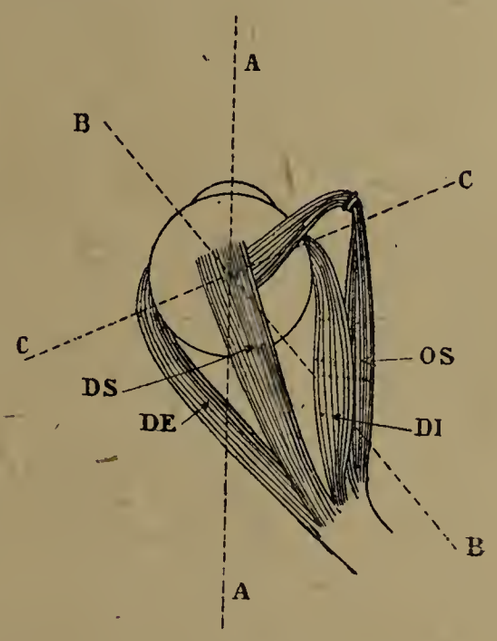


Fig. 32. — Œil gauche vu d'en haut.

Je rappelle que *les muscles agissent par contraction*, par changement de forme avec rapprochement de leurs extrémités (points d'attache, tendons). Le muscle droit interne fait donc tourner la ligne visuelle vers le nez; pendant qu'il se contracte, le droit externe s'allonge passivement en vertu de son élasticité. Inversement pour que la ligne visuelle tourne vers le temporal, le droit externe se contracte; le droit interne est alors passif et s'allonge. Les muscles vont donc toujours deux par deux, respectivement chargés de produire par leur contraction les mouvements inverses. La contraction est due à une *innervation* qui peut être volontaire ou involontaire (*réflexe*).

28. Changement de ligne visuelle.

1° — S'il est possible de comparer des longueurs et des angles *même lorsque la rétine est immobile*, autrement dit s'il est possible de comparer *en vision indirecte*, les comparaisons précises impliquent toujours un mouvement de l'œil. Nous nous servons de la rétine comme d'un compas; en faisant tomber successivement les images à comparer sur les mêmes points de la rétine, nous vérifions si les sensations sont les mêmes. Par exemple on demande si le segment de droite AB est égal au segment de droite parallèle *ab*. Nous fixons alternativement le milieu M de AB et le milieu *m* de *ab;* nous cherchons à déterminer si dans les deux cas les images de A, B; *a, b;* se font respectivement aux mêmes points de la rétine.

Cette opération suppose que nous pouvons *sans tâtonnement* amener successivement sur la *fovea* les images de M et de *m*.

Voyons ce que dit l'expérience.

2° — On fixe M; on veut fixer *m* qui est actuellement *en vision indirecte*.

L'éducation nous donne la connaissance du *degré d'innervation* nécessaire pour effectuer le passage. De l'innervation résulte la contraction des muscles et le changement d'orientation de l'œil, *dans les conditions habituelles de fonctionnement de l'organe*. Pour vérifier à quel point le passage peut être rapide, le lecteur étudiera les mouvements de ses yeux quand il copie une page de chiffres placés à côté de lui. S'il est pianiste, il remarquera avec quelle promptitude son regard passe d'un point de la page de musique à ses doigts, et inversement.

Si quelque chose vient à notre insu fausser la relation habituelle entre l'innervation et la contraction, nous continuons à innerver comme si cette circonstance accidentelle n'existait pas; d'où de curieuses expériences.

Par exemple, à un malade paralysé du muscle droit externe de l'œil droit (muscle qui tire l'œil vers le dehors), on dit de fermer l'œil gauche et de regarder à droite avec son œil droit. Naturellement l'œil reste immobile en raison de la paralysie; mais le malade qui a innervé, croit avoir exécuté le mouvement. Les images ne se déplacent pas sur la rétine; cependant le malade, qui croit avoir tourné la ligne visuelle vers la droite, voit les objets se déplacer dans ce sens : ils participent au mouvement (inexistant) qu'il attribue au globe de l'œil. Prié d'avancer rapidement le doigt vers un objet situé à droite et n'ayant pas le temps de se guider sur l'image du doigt, il le porte trop à droite.

Nous apprécions donc l'angle de deux lignes visuelles par l'effort de volonté nécessaire pour passer de l'une à l'autre.

Il n'y a rien là que de très ordinaire; ce sont des phénomènes bien connus du pianiste. Avec une précision surprenante il lance son bras et son doigt à la distance nécessaire pour atteindre une touche du clavier; il y réussit dans les conditions normales. Mais qu'il attache par un caoutchouc son poignet à sa ceinture : il se trompe parce que le degré d'innervation devient insuffisant. C'est non pas à la contraction actuelle des muscles qu'il juge de la position du bras, mais à l'intensité de l'ordre qu'il a donné pour passer d'une position connue à la position actuelle. Si pour une raison quelconque l'ordre était insuffisant ou exagéré, la position actuelle est erronée. C'est ce qui arrive quand on alourdit le bras ou les doigts (bagues d'exercice) ou qu'on crée des gênes inhabituelles.

29. Changement de champ visuel. Loi de Listing.

1° — Mouvements de l'œil.

L'œil tourne très approximativement autour d'un de ses points O qui

reste fixe par rapport au crâne. Pour déterminer ses mouvements, nous pouvons donc le remplacer par une sphère mobile qui se déplace concentriquement à une sphère fixe de même rayon (fig. 33). Pour faire court, confondons les points nodaux en un centre optique : la ligne visuelle qui va nous servir d'index, passe par la fovea et le centre optique. Un mouvement quelconque de l'œil se décompose donc en un déplacement angulaire de la ligne visuelle (qui passe, par exemple, de OA en OC) et en une rotation autour de cette ligne.

Il s'agit de déterminer ces mouvements.

On appelle *plan de regard* un plan mené par les deux centres optiques et le point fixé (point où se coupent les lignes visuelles). On ne commet pas d'erreur sensible en remplaçant les centres optiques par les centres de rotation.

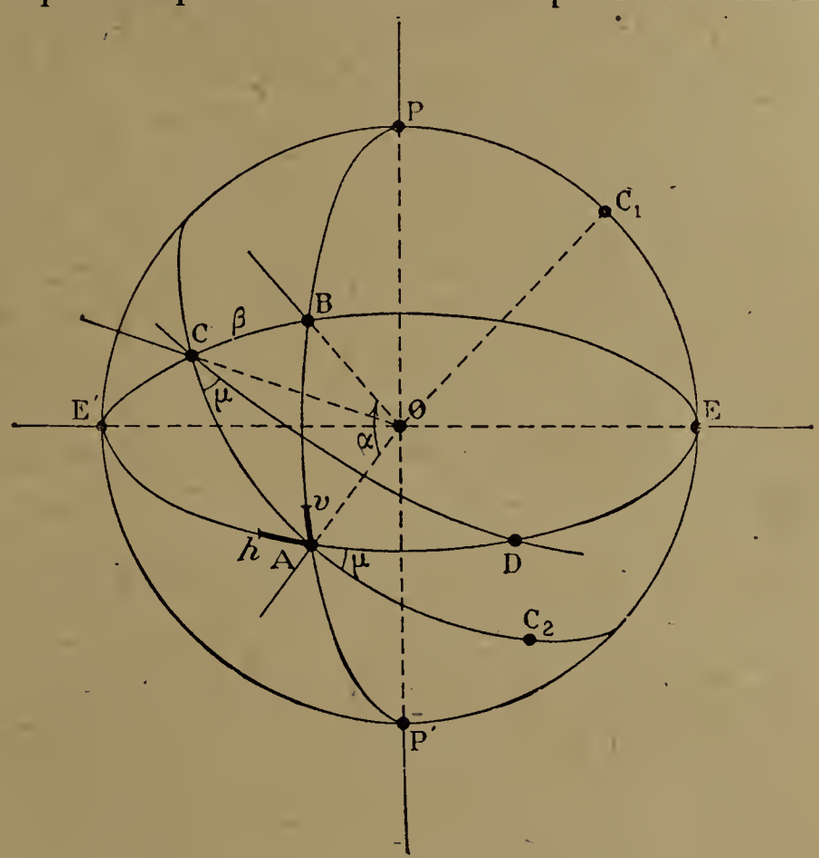


Fig. 33.

Prenons comme repère un certain plan de regard qui sera défini un peu plus loin (*plan de regard primaire*). Tout plan de regard est complètement déterminé par son angle α avec le plan primaire; α est l'angle ascensionnel, il est compté positivement vers le haut (vers le front).

On appelle *plan médian* le plan de symétrie de la tête.

Menons par le centre de rotation O un plan PAP′ parallèle au plan médian; il coupe tous les plans de regard suivant des *lignes médianes*.

Ceci posé, la direction OC d'une ligne visuelle est complètement définie par l'*angle ascensionnel* α du plan de regard correspondant, et par l'*angle latéral* β = COB, quelle fait avec la ligne médiane OB de ce plan. Nous compteront l'angle β positivement vers la droite de celui auquel les yeux sont censés appartenir; dans la figure 33 l'angle β est donc positif.

2° — Loi de Donders.

Lorsque nous donnons α et β, la ligne visuelle OC est déterminée. Mais il n'en est pas de même de la position de l'œil, puisque nous sommes maîtres de le faire tourner autour de OC servant d'axe.

Ici intervient la loi de Donders : *Pour une direction de visée donnée par rapport au crâne* (α et β sont donnés), *la position de l'œil par rap-*

port au crâne est déterminée et indépendante de la manière dont la ligne de visée a été amenée dans sa position actuelle.

Autrement dit, la position de l'œil est uniquement fonction de α et de β.

Nous sommes maintenant capables de définir le plan de regard primaire EAE′ et la direction primaire OA *qui est la droite médiane de ce plan.*

Elle est telle que le simple déplacement latéral ($\alpha = 0$, β quelconque) *ou le simple déplacement ascensionnel* ($\beta = 0$, α quelconque) *n'entraînent aucune rotation de l'œil autour de la ligne visuelle.*

Ces déplacements de l'œil sont donc de pures et simples rotations autour de l'axe P′OP, ou autour de l'axe E′OE, respectivement normaux aux plans EAE′ ou PAP′.

3° — Loi de Listing.

Reste à savoir comment tourne l'œil quand la ligne visuelle passe de la position *primaire* OA à une position *secondaire* quelconque OC.

La rotation est définie par la loi de Listing dont voici trois formes équivalentes.

Le phénomène est de révolution autour de la position primaire.

Cela revient à dire que *pour passer de la position primaire définie par la direction* OA *de la ligne visuelle, à la position secondaire définie par la direction* OC *de cette ligne, l'œil tourne autour de l'axe* OC_1 *normal au plan* OAC.

Dans la position primaire, traçons respectivement sur les deux sphères les grands cercles passant par A et C; ils coïncident puisque les sphères sont concentriques. *Le déplacement de la sphère mobile est un glissement du cercle mobile sur le cercle fixe.*

Le plan lié à la sphère mobile qui coïncide primitivement avec la position primaire du plan de regard, s'appelle *horizon rétinien.* Après rotation autour de OC_1 (c'est-à-dire après glissement du grand cercle mobile AC sur le grand fixe AC), il vient en CD. Il fait avec le nouveau plan du regard E′CE, un angle $\gamma = DCB$, qu'on appelle *torsion.*

Posons : $\rho = \overline{AC}$; on a : $\cos\rho = \cos\beta \,.\, \cos\alpha$;

$$\operatorname{tg}\mu = \frac{\sin\alpha}{\operatorname{tg}\beta}, \qquad \operatorname{tg}\gamma = \frac{\sin\alpha \,.\, \sin\beta}{\cos\alpha + \cos\beta}.$$

Le problème posé est complètement résolu.

4° — Passage d'une position secondaire a une autre.

Nous savons que la torsion est la même dans une position secondaire S_1 quel que soit le chemin parcouru pour l'atteindre. Corrélativement pour aller de la position secondaire S_1 à la position S_2, il est permis de passer par la position primaire. Comme le passage de cette position à une position secondaire quelconque s'effectue au moyen d'une seule rotation, comme deux rotations finies peuvent toujours être remplacées par une seule rotation (Mécanique rationnelle, § 75), nous concluons qu'on peut passer de S_1 à S_2 par une rotation unique.

Déterminons la position de l'axe de cette rotation.

Posons arc $AS_1 = 2\varepsilon$.

Nous avons donc à composer une rotation de pôle R_1, de grandeur $\overline{S_1A} = 2\varepsilon$ et de sens S_1A, à une rotation dont nous savons seulement que le pôle est en R_2 sur le grand cercle dont A est le pôle. Le § 75 de la *Mécanique rationnelle* nous apprend que le pôle de la rotation résultante est sur un grand cercle R_1U faisant avec le cercle R_1R_2 un angle ε en sens inverse du sens S_1A.

Donc tous les axes de rotation qui permettent de passer d'une position secondaire S_1 *à une position secondaire quelconque* S_2, *sont sur un grand cercle qui a pour pôle le point* V *milieu de l'arc* AS_1.

La position primaire A ne présente à cet égard d'autre particularité

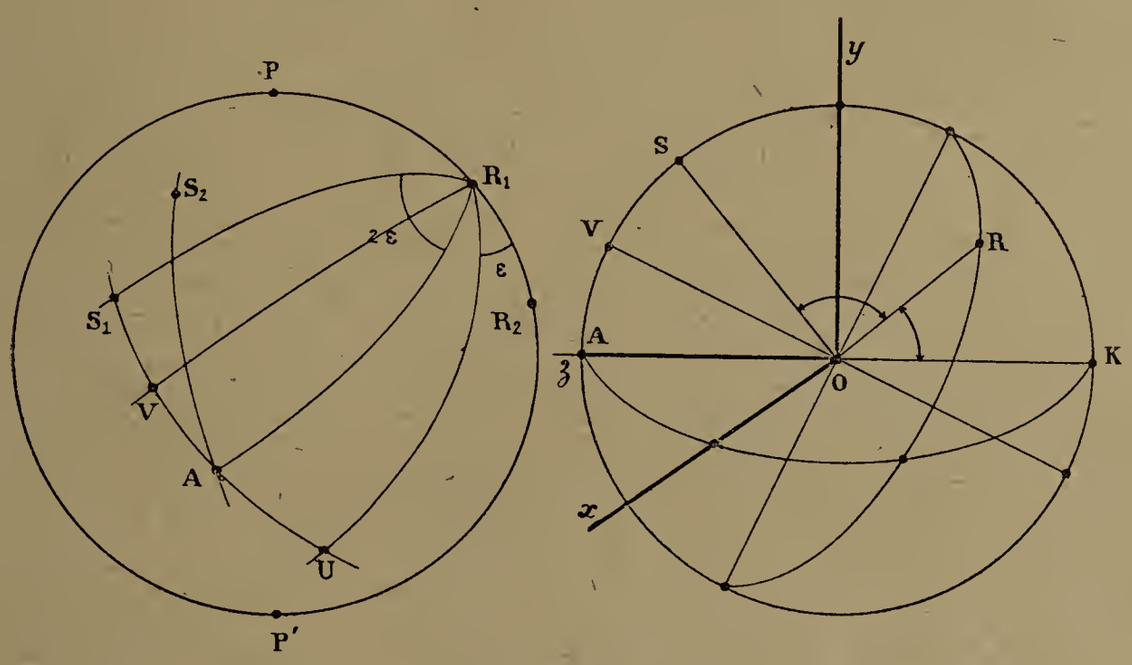


Fig. 33 *bis*.

que la suivante : le plan des axes qui lui correspondent, a pour pôle le point A lui-même.

Nous associons ainsi à tout point S un plan d'axes Π

Donc l'axe de rotation qui permet de passer de S_1 à S_2 est à l'intersection des plans Π_1 et Π_2 correspondants à ces points.

29 *bis*. **Cercles et cônes de direction.**

1° — En vertu de la loi de Listing les phénomènes sont de révolution autour de la direction primaire; il ne faut pas que le choix des coordonnées donne le change à cet égard, je reviendrai là-dessus plus loin.

Soit OS une position secondaire de la ligne visuelle (fig. 33 *bis*, à droite). Nous venons de voir qu'à partir de cette position, tous les mouvements compatibles avec la loi de Listing sont des rotations autour d'axes R situés dans un plan normal à OV bissectrice de l'angle AOS. Soit OR l'axe choisi. Une rotation autour de lui fait décrire au point S un petit cercle C de la sphère. Prolongeons la direction pri-

maire OA; appelons *point occipital* le point K diamétralement opposé à A. Je dis que tous les petits cercles C passent par le point K.

Cela résulte immédiatement des égalités d'angles :

$$AOV = VOS, \qquad SOR = ROK.$$

Les cercles qui passent par S et K, sont appelés *cercles de direction.* Ce sont les intersections de la sphère par les plans menés par les points K et S.

2° — Par un de ces cercles faisons passer un cône de sommet O (*cône de direction*).

Prenons les axes de coordonnées $Oxyz$; soit R le rayon de la sphère. Les coordonnées du point K sont : $x = y = 0, \quad z = -R.$

Un plan passant par ce point a pour équation :

$$ax + by + z = -R. \qquad (1)$$

L'équation de la sphère est :

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2. \qquad (2)$$

L'équation du cône de direction doit satisfaire simultanément aux équations (1) et (2). Elle est donc :

$$(ax + by + z)^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

3° — Disposons un tableau T normalement à la direction primaire OA, c'est-à-dire parallèlement au plan xOy; il a pour équation $z = C$. Les cônes de direction le coupent suivant les coniques :

$$(ax + by + C)^2 = x^2 + y^2 + C^2,$$
$$x^2(a^2 - 1) + y^2(b^2 - 1) + 2abxy + 2aCx + 2bCy = 0. \qquad (3)$$

En particulier spécifions que ces coniques sont symétriques par rapport au plan yOz. Leur équation doit rester la même quand on change x en $-x$; on a donc :

$$a = 0, \qquad -x^2 + y^2(b^2 - 1) + 2bCy = 0.$$

Cette équation représente un faisceau d'*hyperboles;* en effet pour les cercles (1) utilisés, on a $b^3 > 1$.

Ce sont les courbes quasi horizontales de la figure 34.

Spécifions que ces coniques sont symétriques par rapport au plan xOz. Elles ont pour équations :

$$x^2(a^2 - 1) - y^2 + 2aCx = 0.$$

Ce sont les courbes quasi verticales de la figure 34.

Nous versons au *3°* du § suivant le rôle essentiel de ces courbes.

29 *ter.* **Vérification expérimentale de la loi de Listing.**

1° — Pour déterminer les rotations de l'œil, il faut pouvoir tracer un repère sur la rétine, ou, dans notre théorie géométrique, sur la sphère mobile. Les *images accidentelles* (§ 252) le permettant ; nous verrons que

si l'on fixe un instant un segment de droite brillant sur un fond obscur, son image s'imprime sur la rétine d'une manière persistante et permet pendant un certain temps de mesurer les rotations de l'œil.

Sur le tableau T sur lequel nous projetons les sensations visuelles, marquons le point A′ trace de la direction primaire (fig. 34).

Voici l'expérience fondamentale.

Disposons deux droites rectangulaires brillantes $g'A'f'$. Fixons-les : leurs images s'impriment sur la rétine. Transportons la ligne visuelle de OA en OC; sa trace passe de A′ en C′. *Choisissons le point* C′ *dans la direction même du segment* A′g'. L'expérience montre que les images accidentelles restent constamment : l'une confondue avec la droite A′C′, l'autre normale à cette droite.

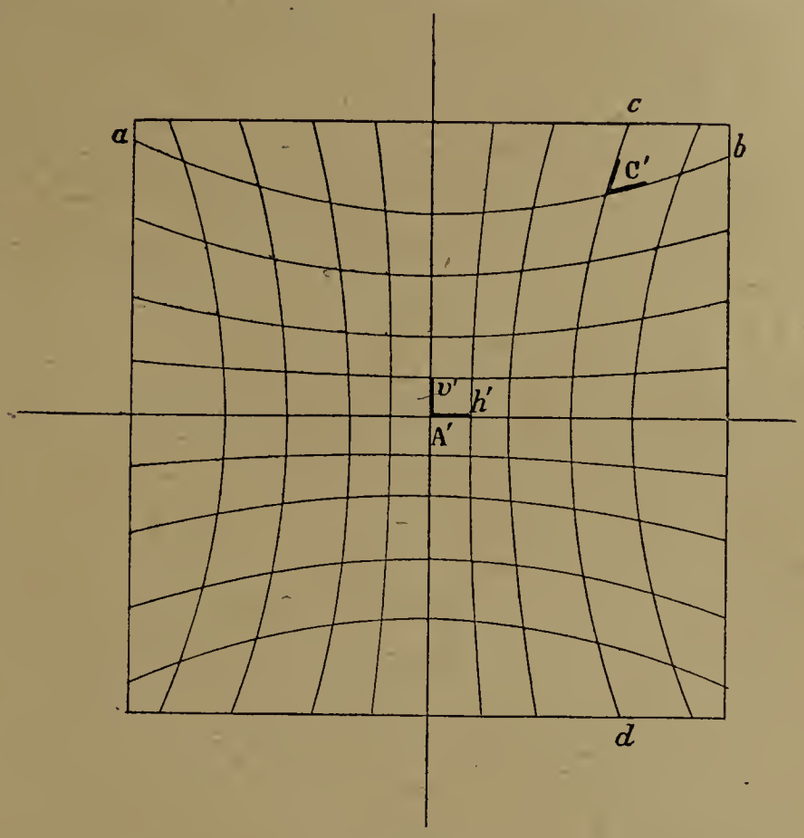


Fig. 34.

C'est l'énoncé même de la loi de Listing : les deux grands cercles AC l'un fixe, l'autre mobile, glissent l'un sur l'autre.

L'expérience réussit quelle que soit la direction A′g'C′, puisque tout est de révolution autour de OAA′.

2° — Cherchons ce que dans le déplacement A′C′ devient un autre système rectangulaire, le système h'Av' par exemple, dont les segments sont l'un horizontal, l'autre vertical.

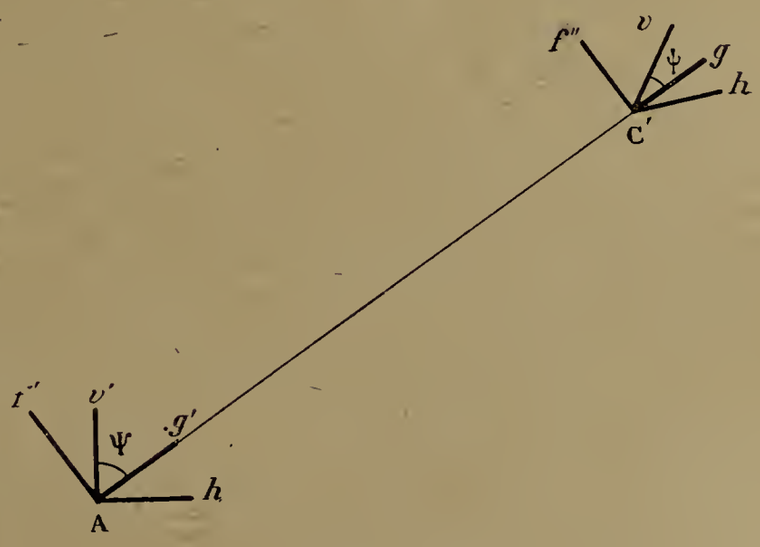


Fig. 35.

Le système complet A$hgvf$ imprimé sur la rétine se déplace sans modification (fig. 35 *bis*); il revient au même de dire qu'il se déplace sans modification sur la sphère mobile de la figure 33. Mais on le projette sur le tableau T *qui est incliné sur la nouvelle ligne de visée* OCC′; les angles des projec-

tions ne sont plus égaux aux angles des lignes projetées, sauf pour le système rectangulaire fAg.

Soit Φ l'angle $g'A'v'$, soit ψ l'angle $g''C'v''$.

Il est facile de montrer qu'on a :

$$\operatorname{tg}\psi = \cos\varphi \,.\, \operatorname{tg}\Psi,$$

où φ mesure l'angle que fait la droite projetante OCC′ avec la direction primaire OAA′. Les angles ψ et Φ ne sont égaux que pour

$$\Psi = 0 \quad \text{et} \quad \Psi = 90^\circ.$$

La figure 34 montre ce que devient le système $h'Av'$ transporté en un point quelconque du tableau.

3° — Enfin cherchons quelle doit être la courbe de déplacement du

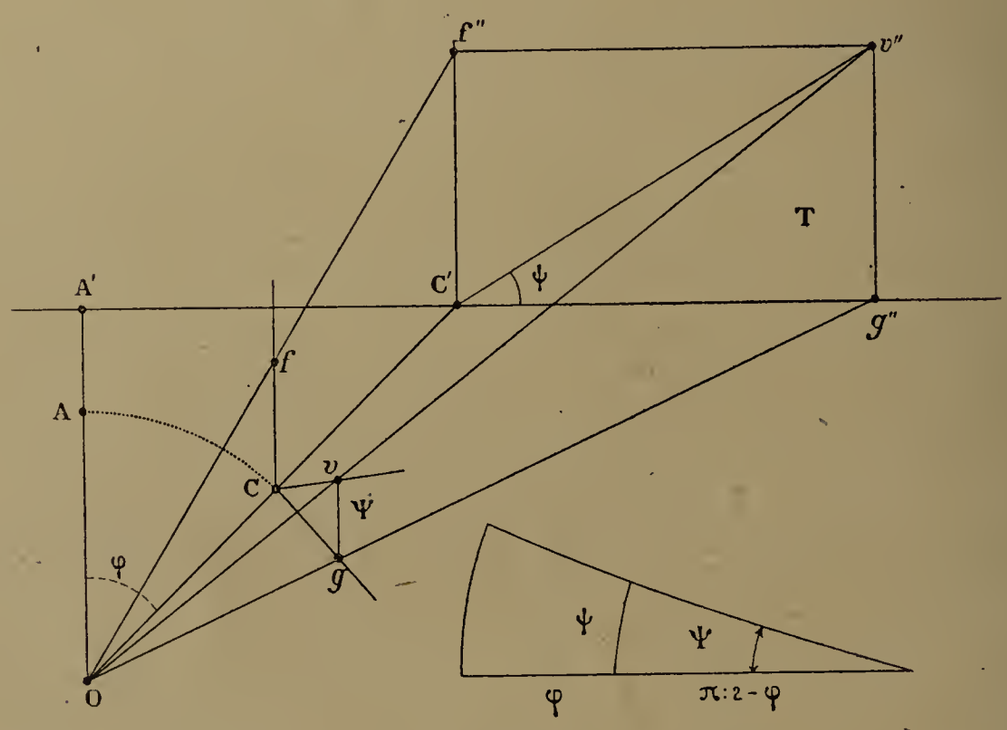


Fig. 35 *bis*.

point de visée projeté C′ pour qu'un segment imprimé sur la rétine reste constamment tangent à cette courbe (fig. 34).

Il est facile de voir qu'elle fait partie du faisceau des hyperboles (3). En effet la droite de visée décrit un cercle ; il est clair qu'un élément de droite tangent à ce cercle lui reste tangent, quelle que soit la rotation. L'hyperbole *ab* est donc telle qu'un segment horizontal $A'h'$ imprimé sur la rétine dans la position primaire, lui reste constamment tangent quand le point de visée la décrit. L'hyperbole *cd* est telle qu'un segment vertical $A'v'$ imprimé sur la rétine dans la position primaire, lui reste constamment tangent quand le point de visée la décrit.

4° — Autres méthodes de vérification.

Tout ce qui fixe l'azimut de l'œil autour de la ligne visuelle permet une vérification. Sans insister sur les expériences qui sont moins pré-

cises que par la méthode des images accidentelles, voici deux procédés possibles.

La *fovea* et le *punctum cæcum* fixent une droite sur la rétine. Si pour une direction autre que la primaire, on détermine la projection de cette droite sur le tableau T (en s'appuyant sur la cécité même du *punctum cæcum*), on détermine par le fait la rotation de la rétine.

L'œil est généralement astigmate (voir mon cours d'*Optique Géométrique*); pour déterminer sa torsion, il suffit de déterminer la rotation des plans principaux.

CHAPITRE III

CONNAISSANCE DU MONDE EXTÉRIEUR

30. **Préliminaires.**

Depuis des siècles les hommes bataillent pour savoir s'il faut maintenir le rôle de l'esprit comme intelligence et comme volonté, les sensations n'étant l'origine de la connaissance que par l'intervention de cette intelligence antérieure et indépendante d'elles; ou si toute connaissance humaine est le résultat des sensations.

Ce problème m'est indifférent pour deux raisons : la première est que nécessairement positiviste en tant que savant et quels que puissent être mes goûts métaphysiques, je néglige les questions insolubles; la seconde est que si le problème a un sens pour le premier homme, pour Adam, il en est privé pour nous qui avons une ascendance longue et dont l'intelligence est une résultante. Or ce qui m'intéresse est non pas de savoir comment Adam a acquis ses connaissances sur le monde extérieur, mais comment l'enfant qui naît aujourd'hui acquiert les siennes, *ce qui est tout différent.*

Aimant les œufs frais, j'ai des poules et m'occupe de mes poussins. Quand ils naissent, je les mets à sécher dans un pot où ils sont dans l'obscurité. Après une demi-heure si je les pose par terre et que je frappe de petits coups sur le sol, mes poussins s'approchent en courant et piquent devant eux. Ai-je besoin de dire que si intelligents que je les imagine, ils n'ont pas eu le temps de faire avec leurs propres sens, l'éducation que suppose ces gestes compliqués, *à partir d'un cerveau qu'on supposerait table rase.*

Quelles que soient nos tendances métaphysiques, nous devons donc admettre qu'en l'an de grâce 1916, l'intelligence des nouveau-nés existe antérieurement aux sensations. En venant au monde nous apportons des idées *en puissance.* Mais à les supposer aussi nombreuses qu'on voudra, je ne conçois pas trop ce que notre intelligence parviendrait à en faire sans quelque porte ouverte sur le monde extérieur; en un mot je ne conçois pas ce que serait la pensée chez un homme privé de tous ses sens.

S'opposant à l'école sensualiste, Leibnitz disait : « *Nihil est in intellectu quod non fuerit prius in sensu,... nisi ipse intellectus* ». Par le mot

intellectus il faut entendre l'activité propre de l'esprit, activité antérieure à l'expérience et qui travaille sur l'expérience. On peut discuter la formule de Leibnitz à propos d'Adam; tout le monde est bien obligé de l'accepter aujourd'hui *comme démontrée par l'expérience* dès qu'il s'agit des nouveau-nés. Quant à la question de savoir comment s'est lentement formé l'*intellectus* humain par suite des acquisitions héréditaires successives, encore une fois cela m'est égal. Comme, du reste, c'est le problème entier de l'origine de l'homme qui se trouve ainsi posé, on ne s'étonnera pas que je ne m'en mêle en aucune manière.

Une observation qu'on ne peut négliger à ce sujet, est la suivante : l'éducation des bêtes est beaucoup plus rapide que celle des hommes; il semble que les bêtes sachent tout en naissant, peut-être parce qu'elles ont beaucoup moins à apprendre. Rien n'est amusant comme une poule qui va pondre pour la première fois et que, dans ces graves circonstances, le coq, *aussi jeune qu'elle*, soutient de ses conseils. En tout cas c'est là un utile sujet de méditation pour ceux qui croiraient ravaler l'esprit humain s'ils ne pensent pas qu'il sait tout sans avoir tâtonné pour l'apprendre. Disons simplement qu'il doit tout apprendre, mais que, *pour une raison ou pour une autre*, il a beaucoup de dispositions.

Le problème que nous devons résoudre, n'a donc rien de métaphysique. Si à la rigueur la solution n'est pas imposée *sans contestation* par les faits (le nombre des expériences cruciales est encore trop restreint), au moins devons-nous la concevoir comme expérimentalement possible. Il est infiniment probable que nous devons dire avec Helmholtz : *Les sensations sont pour notre conscience des signes dont l'interprétation est livrée à notre intelligence*, tout en prenant cette formule dans un sens très différent de celui qu'Helmholtz lui donnait.

Je ne dis pas qu'elle résume la *théorie empiriste* par opposition à la *théorie nativiste*, parce que, depuis Helmholtz et Hering qui furent les champions modernes de ces doctrines, nos idées sur l'influence de l'hérédité sont venues les assouplir : on ne sait vraiment plus en quoi leurs formes actuelles diffèrent pour ceux qui laissent la métaphysique aux philosophes de profession. Nul ne soutiendrait aujourd'hui que le cerveau du nouveau-né est une *table rase*, pas plus qu'on ne défendrait la thèse de l'inutilité des expériences personnelles pour l'acquisition des notions fondamentales. Il existe certainement en 1916 un mécanisme préétabli, mais dont le fonctionnement régulier exige certains tâtonnements.

La difficulté qu'on éprouve dans la discussion du problème, vient d'habitudes prises, *de jugements erronés, systématiquement acquis en vue de l'utilité*. Nous devons donc amener le lecteur à dissocier des groupements d'idées qui lui paraissent nécessaires et, pour arriver à savoir ce que précisément nous devons à la vue, nous demander ce que nous serions sans elle. D'où une gymnastique que la *Statue de Condillac* nous permet sans difficulté.

Ces considérations ne sont pas hors de mon sujet; le plus difficile en cette matière est de quitter ses préjugés. Bien qu'on n'ait jamais vu des êtres humains réduits à un sens unique, ou des êtres humains privés dès leur naissance de l'ouïe, du goût, de l'odorat ou du tact et recouvrant brusquement ces sens, il nous est permis de conjecturer ce qui arriverait alors.

Au surplus nos raisonnements sont vérifiés dans un cas fondamental, celui où l'être humain recouvre la vue à un âge où sa raison est développée par le tact.

31. La statue de Condillac; la statue bornée au sens de l'odorat.

1° — Pour incomplet et trop systématique que soit le *Traité des sensations* de Condillac, il est puissamment suggestif et d'une lecture particulièrement attachante. On le démarque sans le citer, au point que dans l'*Optique physiologique* d'Helmholtz le nom de Condillac n'est pas prononcé. Je ne connais cependant pas de meilleure introduction à la question qui nous occupe, malgré le dédain où les psychologues actuels semblent tenir notre philosophe.

Condillac imagine une statue organisée intérieurement comme nous et *animée d'un esprit privé de toute espèce d'idées*. C'est en cela que son hypothèse est contestable, un cerveau humain *actuel* ayant toute une ascendance dont il ne peut se débarrasser; du reste cette spécification n'intervient pas essentiellement sur la suite des raisonnements. Condillac suppose que la statue n'a l'usage d'aucun de ses sens, mais qu'il est libre de les ouvrir à son choix, isolément ou par groupes; il demande quel est alors l'état possible des connaissances de la statue sur le monde extérieur. Cette dissociation hypothétique de nos sensations est d'un vif intérêt comme nous forçant à réfléchir sur des notions que l'habitude nous amène à confondre ou à négliger.

Pour placer le lecteur au meilleur point de vue, je résume les premiers chapitres où Condillac étudie ce que serait *l'état d'un homme limité au sens de l'odorat*, sens qui semble le moins susceptible de fournir des renseignements sur le monde. Il s'agit non pas de discuter tel ou tel détail des raisonnements de Condillac, mais de nous mettre dans l'état d'esprit convenable pour comprendre comment, suivant les physiciens et physiologistes modernes, nous parvenons à la connaissance du monde extérieur.

2° — Statue bornée au sens de l'odorat.

Par hypothèse la statue ne peut connaître que des odeurs. Si nous lui présentons une rose, elle est par rapport à nous une statue qui sent une rose; mais par rapport à elle-même, elle n'est que l'odeur même de cette fleur.

Elle n'a aucune idée de ce que nous appelons la matière.

Elle est capable d'attention; elle est capable de jouir et de souffrir.

L'odeur qu'elle sent ne lui échappe pas entièrement aussitôt qu'on écarte le corps odorant; il en reste une impression plus ou moins forte : *c'est la mémoire.* Lorsque survient une nouvelle odeur, ayant encore présente celle du moment précédent, sa capacité de sentir se partage entre les deux. Il y a donc en elle deux manières de sentir suivant que la sensation est actuelle ou passée : elle conserve une image, une représentation des deux odeurs abolies.

La statue acquiert ainsi l'idée de succession, par suite l'idée de la durée passée; afin de ne rien préjuger et nous concilier les nativistes, posons qu'elle développe seulement une idée qu'elle possède en puissance. Pour avoir une idée de l'avenir, il faut qu'elle ait éprouvé à plusieurs reprises la même suite de sensations. Elle acquiert l'habitude de juger qu'après telle modification telle autre doit suivre : elle *induit* le retour d'une modification.

« Prenons par exemple cette suite : jonquille, rose, violette. Dès que ces odeurs sont constamment liées dans cet ordre, une d'elles ne peut affecter son organe qu'aussitôt la mémoire lui rappelle les autres dans le rapport où elles sont à l'odeur sentie. Ainsi, qu'à l'occasion de l'odeur de violette, les deux autres se retraceront comme ayant précédé : *la statue se représentera une durée passée;* de même à l'occasion de l'odeur de jonquille, celles de rose et de violette se retraceront comme devant suivre : *la statue se représentera une durée à venir.* »

L'idée *de causalité* ne lui parviendra que sous la forme rudimentaire *de succession :* elle se trompera donc ordinairement dans ses inductions.

Jouissant et souffrant, pourvue de mémoire, elle est capable de désir, d'espérance et de crainte. Elle possède une idée rudimentaire de nombre.

Notre statue peut être réduite à n'être que le souvenir d'une odeur; alors le sentiment de son existence actuelle lui échappe. Par la mémoire elle sent qu'elle a existé, mais ce sentiment s'affaiblit en raison du temps qui s'écoule et comme conséquence que la mémoire s'efface. Quand son odorat vient au repos, son état est celui du sommeil.

La statue a une *personnalité* constituée par l'ensemble des odeurs qu'elle a été. A la vérité, cette personnalité n'existe pas à la première odeur : le mot ne convient qu'à l'être qui remarque que, dans le moment présent, il n'est plus ce qu'il a été. Tant qu'il ne change point, il existe sans retour sur lui-même; mais aussitôt qu'il change, il juge qu'il est cependant le même qu'il était auparavant : il dit *moi.* Les odeurs dont la statue ne se souvient pas, n'entrent pas dans l'idée qu'elle a de sa personne. Elles sont aussi étrangères à son *moi* que les couleurs et les sons dont elle n'a aucune connaissance. Son *moi* est la collection des odeurs qu'elle éprouve et de celles que la mémoire lui rappelle. C'est la conscience de l'odeur qu'elle est et des odeurs qu'elle a été.

32. **La statue de Condillac bornée à la vue.**

1° — L'analyse relative aux états d'âme de la statue bornée au sens

du goût est identique à la précédente. L'hypothèse de Condillac devient du plus haut intérêt appliquée au sens de la vue.

J'irai très vite parce que plus loin je reprends l'ensemble des résultats en les considérant d'un autre biais.

Pour extraordinaire que cela paraisse, notre statue ne voit que de la lumière diversement colorée, soit simultanément, soit successivement : elle ne peut juger qu'il y existe quelque chose hors d'elle. Sa connaissance du monde extérieur reste aussi nulle que pour l'appareil sensoriel borné à l'odorat; le fait que ses sensations simultanées sont multiples, tout en compliquant son état actuel, ne modifie en rien les conséquences qu'elle en peut tirer.

Elle apprend d'abord à démêler les couleurs qui, par un procédé quelconque, se forment au fond de son œil ; l'une d'elles attire son attention par le plaisir qu'elle lui cause. Peu à peu elle arrive à les discerner dans un ordre successif, puis à en discerner plusieurs à la fois.

Condillac admet d'abord que la statue se sent comme une *étendue colorée;* mais avec raison il limite immédiatement cette affirmation en remarquant que cette étendue ne peut être ni une surface ni aucune grandeur déterminée. Ce n'est pas une surface, parce que l'idée de surface suppose l'idée de solide, idée que la statue ne peut avoir.

Il est beaucoup plus juste de dire que la statue bornée au sens de la vue jouit d'un grand nombre de sens ayant tous des propriétés identiques, mais pouvant être modifiés simultanément de manières non identiques. Ici l'idée d'étendue n'intervient plus ; c'est l'idée toute différente d'un grand nombre de déterminations simultanées.

2° — Je reviendrai là-dessus plus loin ; je transcris seulement une page de Condillac qui résume admirablement le problème et la solution que nous lui donnerons.

« La philosophie découvre que nos sensations ne sont pas les qualités mêmes des objets, et qu'au contraire elles ne sont que des modifications de notre âme. » C'est ce que nous exprimons aujourd'hui en disant que *les sensations ne sont rien que des signes dont seule l'expérience nous apprend le sens.* Taine compare judicieusement les sensations et les mots. « Comme chaque mot, chaque sensation rétinienne a son groupe d'images associées; elle représente ce groupe; elle le remplace et le signifie. En d'autres termes, elle lui est toujours associée et n'est jamais associée qu'à lui, en sorte qu'elle lui équivaut pour l'usage. »

Revenons à Condillac. « Nous n'apercevons rien qu'en nous-mêmes. Un homme borné à l'odorat n'eût été qu'odeur; borné au goût, saveur; à l'ouïe, bruit et son ; à la vue, lumière et couleur. Le plus difficile est d'imaginer comment nous contractons l'habitude de reporter en dehors les sensations qui sont en nous; en effet il paraît bien étonnant qu'avec des sens qui n'éprouvent rien qu'en eux-mêmes et qui n'ont aucun moyen pour soupçonner un espace au dehors, on puisse rapporter ses sensations aux objets qui les occasionnent. »

« Mais en considérant les propriétés du toucher (Condillac ne distingue pas dans le langage les sensations tactiles des sensations musculaires), on reconnaît qu'il est capable de découvrir cet espace et d'apprendre aux autres sens à rapporter leurs sensations aux corps qui y sont répandus. »

Reprenons pied à pied cette analyse, trop systématique si l'on veut, mais qui contient une grande part de vérité.

33. Localisation des sensations.

1° — Pour peu que le lecteur ait réfléchi sur ce qui précède, il est tout prêt à concéder qu'au sujet du rôle et de la hiérarchie des sens, ses jugements d'habitude, *jugements qui sont assurément les meilleurs possibles en pratique*, sont incontestablement erronés. Il sera donc peu surpris du singulier résultat que fournit une analyse attentive, au sujet de la localisation des sensations. *Les sensations ne sont autant dire jamais situées à l'endroit où nous les plaçons; l'utilité nous contraint à une erreur systématique et acquise.* Nous avons appris à sentir là où nous avons intérêt à sentir et non pas là où nous sentons réellement.

Je sens actuellement mon porte-plume entre les doigts; pourtant la sensation est non dans ma main, mais dans mon cerveau. Je la situe à tort à la périphérie de mon système nerveux; à la vérité, c'est à la périphérie que se produit l'ébranlement, mais c'est au centre qu'il s'enregistre.

Comme preuve de l'erreur habituelle de localisation, on n'a que l'embarras du choix.

Les amputés éprouvent les mêmes sensations que s'ils avaient encore le membre disparu. Un homme amputé de la cuisse depuis douze ans ressentait des douleurs dans les orteils et la plante du pied. L'illusion des amputés devient telle pendant la nuit, que, pour la chasser, ils doivent porter la main à l'endroit où devrait être le membre enlevé. Au moment de la section des nerfs dans une amputation, les douleurs éclatent dans les parties qu'on retranche; une maladie de la moelle se traduit par des fourmillements dans les extrémités saines, etc., etc.

2° — Dans son *Traité de l'Intelligence* auquel je renvoie, Taine cite une foule d'exemples curieux.

Les poils et les dents, par exemple, sont dépourvus de nerfs, par suite insensibles. Pourtant si l'on touche les poils de notre barbe, nous localisons la sensation à quelque distance de notre peau. Si nous mettons un petit bout de bois entre nos dents, nous croyons le sentir à la superficie des dents, tandis que nous n'avons pas conscience d'une pression dans l'alvéole qui contient la dent, alvéole où en réalité se produit l'ébranlement nerveux. Ici deux erreurs *acquises* superposées : la sensation centrale est reportée non plus seulement au lieu d'ébranlement, mais au delà de ce lieu.

L'expérience est nécessaire pour qu'on arrive à situer ses sensations, *je ne dis pas exactement, mais au mieux pour l'usage.*

Qu'on en juge par l'expérience suivante de Paul Bert.

On implante dans le dos d'un rat le bout de sa queue avivée au bistouri : elle se greffe. On coupe la queue à un centimètre de sa naissance : le rat a donc une queue plantée à rebours dans le dos. Au bout de trois mois, quand on lui pince la queue, le rat réagit peu. La sensibilité augmente lentement. *Au bout d'un an le rat a pris conscience de l'endroit où on le pince :* il se retourne pour mordre l'instrument.

Bref nous apprenons à localiser nos sensations là où se trouvent leurs causes. Quand elles ont pour condition *ordinaire* la présence d'un objet extérieur à notre corps, l'expérience nous apprend peu à peu à objectiver en cet endroit la modification centrale qui les constitue.

34. Construction de la représentation de notre corps et des corps étrangers.

Ces préliminaires nous permettent d'aborder la question fondamentale : *par quel procédé arrivons-nous à la représentation de notre propre corps et des corps étrangers?*

La réponse est soupçonnée depuis une haute antiquité : *nous ne connaissons le monde extérieur que grâce aux sensations musculaires et tactiles.*

Voici comment Condillac parle de sa statue qu'il borne au *toucher*, comprenant dans ce mot l'ensemble des sensations que donnent le mouvement des membres et le contact avec la peau. On se représentera un enfant sourd, muet et aveugle dans son berceau; il importe peu de lui laisser le goût et l'odorat dont il ne saurait tirer grand parti. L'hypothèse n'est pas absurde : par un effort de patience, on peut éduquer des sourds-muets aveugles.

« C'est naturellement, machinalement, par instinct et à son insu que la statue se meut;... ses mouvements doivent naturellement se répéter et se varier;... il lui arrivera nécessairement de porter à plusieurs reprises ses mains sur elle-même et sur les objets qui l'approchent. En les portant sur elle-même elle ne découvrira qu'elle a un corps que lorsqu'elle en distinguera les différentes parties et qu'elle se reconnaîtra dans chacune pour le même être sentant. Elle ne découvrira qu'il y a d'autres corps que parce qu'elle ne se retrouvera pas dans ceux qu'elle touche. »

Dans la sensation tactile, il faut comprendre la sensation de contact (dur, mou, poli, rude, humide, sec, adhérent, visqueux,...) et celle de chaud et de froid.

« Si jusqu'ici la main de la statue, en se portant d'une partie de son corps sur une autre, a toujours franchi (sauté par-dessus) des parties intermédiaires, elle se trouvera dans chacune comme dans autant de corps différents; elle ne saura pas encore que toutes ensemble elles ne

forment qu'un corps.... Mais s'il lui arrive de conduire sa main le long de son bras et, sans rien franchir, sur sa poitrine, sur sa tête... elle sentira pour ainsi dire sous sa main *une continuité du moi;* cette même main qui réunit dans un seul continu les parties auparavant séparées, en rendra l'étendue plus sensible.

« La statue apprend donc à connaître son corps et à se reconnaître dans les parties qui le composent.

« Si elle touche un corps étranger, le *moi* qui se sent modifié dans la main, ne se sent pas modifié dans ce corps. Si la main dit *moi*, elle ne reçoit pas la même réponse. » La statue juge par là de l'existence de corps qui lui sont étrangers. « Elle n'aperçoit pas les corps en eux-mêmes, elle n'aperçoit que ses propres sensations. Quand plusieurs sensations distinctes et coexistantes sont circonscrites par le toucher dans des bornes où le *moi* se répond à lui-même, la statue prend connaissance de son corps. Quand plusieurs sensations distinctes et coexistantes sont circonscrites par le toucher dans des bornes où le *moi* ne se répond pas, la statue a l'idée d'un corps différent du sien. Dans le premier cas, ses sensations continuent d'être des qualités à elle; dans le second, elles deviennent les qualités d'un objet tout différent.

« Elle étend ses bras pour se chercher hors d'elle. Elle est inquiète de savoir jusqu'où elle est. Elle prend donc, quitte et reprend tout ce qui est autour d'elle; elle se saisit, elle se compare avec les objets qu'elle touche; et à mesure qu'elle se fait des idées plus exactes, son corps et les objets lui paraissent se former sous ses mains.

« Lorsqu'elle commence à toucher, elle doit croire toucher tout; ce ne sera qu'après avoir passé d'un lieu dans un autre et avoir manié bien des objets, quelle pourra soupçonner qu'il y a des corps au delà de ceux qu'elle saisit.

« Dans les commencements elle ne sait pas encore régler ses mouvements. Elle ignore comment conduire sa main pour la porter sur une partie de son corps plutôt que sur une autre. Elle fait des essais, elle se méprend, elle réussit; en un mot elle tâtonne. Elle se fait peu à peu une habitude des mouvements qui la rendent capable de veiller à sa conservation : c'est alors qu'elle se meut à sa volonté. »

35. Diverses acquisitions que fait la statue bornée au sens du toucher.

Continuons à résumer Condillac dans son admirable analyse. Remarquons en passant à quel point le langage de ce philosophe diffère de celui de nos manuels de philosophie, en beauté comme en clarté.

1° — « La statue s'agite sans but déterminé; et cette agitation est elle-même un sentiment dont elle jouit avec plaisir, car elle en sent mieux son existence. Si sa main rencontre un objet qui fasse sur elle une impression agréable de chaleur ou de fraîcheur, aussitôt ses mouvements sont suspendus : elle se livre tout entière à ce nouveau sentiment.

« Chaque fois qu'elle découvre un nouvel espace et touche de nouveaux objets, elle règle ses mouvements pour mieux jouir des sensations qui lui plaisent.... Elle se rappelle confusément ce dont elle a joui. Se souvenant d'un côté de ce qu'elle doit à ses mouvements, sentant de l'autre que ses mouvements sont à sa disposition, elle désire encore parcourir cet espace et se procurer les sensations qu'elle a appris à connaître. Elle ne se meut donc plus pour le seul plaisir de se mouvoir. Elle éprouve de temps en temps des sentiments inconnus; elle juge que ses mouvements sont propres à lui procurer de nouveaux plaisirs et cet espoir devient le principe qui la meut. Elle commence à juger qu'il y a des découvertes à faire : elle devient capable de curiosité.

« Dans les commencements, elle ne fait que se traîner; elle va ensuite sur ses pieds et sur ses mains. Rencontrant enfin une élévation, elle est curieuse de ce qui est au-dessus d'elle : comme par hasard, elle se trouve sur ses pieds. Elle chancelle, elle tombe, se heurte et ressent de la douleur. Elle n'ose plus se soulever : la crainte de la douleur balance l'espérance du plaisir.

« Peu à peu la douleur se dissipe, et le souvenir qui lui en reste, trop faible pour contenir le désir de se mouvoir, est assez fort pour la faire mouvoir avec crainte. De là naît une sorte d'industrie, c'est-à-dire l'art de régler ses mouvements et de faire usage des objets pour prévenir les accidents auxquels elle est exposée. »

2° — Peu à peu la statue acquiert des idées. « Parce qu'elle rencontre tour à tour de la solidité et de la fluidité, de la dureté et de la mollesse, de la chaleur et du froid, elle donne son attention à ces différences, elle les compare, elle en juge; et ce sont autant d'idées par où elle apprend à distinguer les corps.

« En serrant un caillou, notre statue se fait l'idée d'un corps différent d'un bâton qu'elle a touché dans toute sa longueur. Elle sent dans un cube des angles qu'elle ne peut trouver dans un globe; elle n'aperçoit pas la même direction dans un arc continu ou dans un jonc bien droit. Elle acquiert donc les idées de ligne droite, de ligne courbe et de plusieurs sortes de figures.

« En ne donnant son attention qu'à la solidité des corps, elle sépare cette qualité des autres qu'elle néglige. Elle fait de la même manière les *idées abstraites* de figure, de mouvement...; et aussitôt chaque notion se généralise parce qu'elle remarque qu'il n'en est point qui ne convienne à plusieurs objets ou qui ne se retrouve dans plusieurs collections. »

3° — En définitive la statue bornée au seul sens du toucher est bien près d'avoir toutes nos idées, naturellement celle de couleur exceptée. Ce n'est plus un rudiment d'être comme quand elle ne possède que l'odorat, le goût, l'ouïe OU MÊME LA VUE; c'est un être complet qu'il est possible d'éduquer.

Évidemment un être humain réduit au sens du toucher est heureu-

sement rare; mais un aveugle-né doit en différer surtout par la plus grande facilité qu'on a de communiquer avec lui, non par la nature des idées qu'il possède.

La description de Condillac s'applique à merveille à l'enfant dans son berceau; elle est indépendante de la théorie métaphysique qu'on choisit. Si pour le sensualiste, la sensation crée les idées, pour son adversaire, elle réalise les idées en puissance, ce qui pour le physicien revient exactement au même.

A mesure que la statue découvre son propre corps, elle apprend à localiser la sensation à la périphérie, c'est-à-dire là où se trouve ordinairement sa cause.

36. **Aveugles sourds et muets.**

1° — Le cas célèbre de Laure Brigman est bien fait pour nous apprendre ce qu'on peut obtenir du toucher. Née en 1829, elle perdit à deux ans la vue, l'ouïe, l'odorat et le goût; comme il arrive ordinairement pour les sourds en bas âge, elle devint muette. Elle semblait donc condamnée à rester au-dessous de la dernière des brutes; on parvint cependant à en faire un esprit supérieur à la moyenne. A la vérité elle avait vu pendant deux ans; mais il semble que la longue maladie qui lui enleva l'usage de ses sens, ait supprimé le souvenir du passé.

Jusqu'à sept ans elle resta dans sa famille; on ne pouvait, en la tirant ou la poussant, que lui indiquer vaguement quelques actes élémentaires, de s'approcher ou de s'éloigner d'une personne, par exemple. De petits coups frappés doucement à la tête signifiaient l'approbation, et sur le dos la désapprobation. Il est à supposer qu'on se servait des aliments comme moyen de récompense ou de blâme.

A sept ans, elle entra dans un institut d'aveugles dirigé par le docteur Howe qui entreprit de l'éduquer.

Ce qui suit est du plus haut intérêt.

Il prit un objet d'usage commun (fourchette, cuillère,...) et colla dessus un petit écriteau portant son nom en caractères saillants. Elle palpa les noms avec beaucoup de soin et apprit à distinguer les écriteaux comme les objets. D'autres écriteaux *mais séparés des objets* lui furent présentés; elle reconnut qu'ils étaient semblables à ceux que portaient les objets. Les écriteaux furent alors remplacés par de petits cartons portant chacun une lettre; on les rapprocha de manière à reconstituer les écriteaux. Elle toucha les lettres jusqu'à les reconnaître, *puis on les mêla* et on lui apprit à recomposer les écriteaux. Elle eut alors une sorte de révélation confuse de ce qu'on pouvait obtenir à l'aide de ce procédé : la partie était gagnée.

On lui constitua une sorte de *casse* (§ 380) avec des caractères en relief qu'elle pouvait ranger dans les trous d'une planche. On lui apprit à écrire le nom des objets qu'on lui présentait. On fit un pas nouveau en lui enseignant à représenter par la position de ses doigts les différentes

lettres. Tout ceci ne demanda pas plus de trois mois. Pendant deux ans et demi on se borna à lui apprendre le nom des objets, puis à désigner les qualités qu'elle pouvait y apercevoir. Elle apprit à joindre l'adjectif au nom.

Pour lui faire comprendre l'idée de relation, il fallut beaucoup de patience. Un anneau fut placé *sur* une boîte, puis *sur* un chapeau,... on varia l'expérience jusqu'à ce qu'elle épelât successivement le nom des objets qui étaient l'un *sur* l'autre. On mit alors l'anneau *dans* une boîte, *dans* un verre.... Elle parvint enfin à comprendre ce qu'on voulait d'elle et le montra en plaçant l'une de ses mains *sur* l'autre ou *dans* l'autre.

Elle acquit facilement l'usage des verbes actifs, surtout de ceux qui expriment une action appréciable par le toucher, *marcher*, *courir*, *secouer*....

Ici se place une remarque intéressante. Lorsqu'elle commença à se servir des adjectifs, ils exprimèrent pour elle les qualités *individuelles* des corps qu'elle touchait; les mots *grand*, *petit*, *lourd*, *large*,... ne furent que des spécifications caractéristiques d'un objet particulier, des noms *propres* donnés à certains objets. Ce ne fut que plus tard qu'elle parvint à considérer les qualités *in abstracto*. A preuve que lorsqu'on lui apprit que les personnes avaient des noms propres et des noms de familles, elle supposa qu'il fallait appliquer le même principe aux choses inanimées et demanda quels étaient les autres noms de la chaise, de la table,....

2° — Laure Bridgman n'est pas unique dans son cas. Une autre Américaine, Helen Keller, née en 1882, parle plusieurs langues et a subi des examens universitaires. *On lui a même appris à parler* en lui faisant toucher les mouvements du pharynx, des lèvres, de la langue qui accompagnent la parole humaine. Par imitation de ces mouvements, elle reproduit les sons articulés; de sorte qu'elle converse avec un visiteur, pourvu qu'elle lui place un doigt sur le pharynx, un sur les lèvres, un troisième à la base du nez.

Parmi les sourds-muets aveugles *éduqués*, on cite deux Françaises, Marthe Obrecht et Marie Heurtin, un Américain, Richard Clinton, un Italien, Eugenio Malossi, un Espagnol, Inocencio Juncar.... Cette énumération prouve que l'éducation des sourds-muets aveugles n'a plus aujourd'hui rien de sensationnel. Il est certain que leurs facultés intellectuelles sont identiques aux nôtres. Naturellement ils ne peuvent se représenter la lumière, la couleur, la perspective, le beau physique; mais en cela ils ne sont guère inférieurs à nombre de clairvoyants « pour lesquels le monde extérieur n'existe pas ».

Je cite ces exemples pour amener mon lecteur à prendre une idée exacte de ce que nous devons à la vue et pour détruire chez lui le préjugé que l'aveugle est un quasi gâteux. L'aveugle est un homme qui ne voit pas; ce qui ne signifie en aucune manière qu'il soit incapable des opérations intellectuelles même les plus compliquées.

3° — Cas de Marie Heurtin.

Je dirai quelques mots du cas de Marie Heurtin, Française actuellement bien vivante, parce que c'est une sourde-muette aveugle de *naissance;* elle ne doit certainement rien au souvenir. Elle est née en 1885 et ne commença son éducation qu'à dix ans.

Voici comment on débuta.

Marie Heurtin avait un petit couteau auquel elle tenait beaucoup. La sœur qui était chargée d'elle, le lui retira en lui mettant aussitôt les mains l'une sur l'autre, ce qui est le signe abrégé du couteau chez les sourds-muets. Marie se fâche; on lui rend le couteau, puis on le lui retire en reproduisant son signe. On recommence jusqu'à ce qu'elle ait compris le rapport entre le signe et l'objet, et qu'elle redemande d'elle-même l'objet en faisant le signe. Au couteau, on substitue des fruits et successivement divers objets tout en leur donnant des signes particuliers. Ainsi Marie parvient à l'idée de signe; ce qui est le premier pas dans l'acquisition d'un langage.

Je n'insiste pas sur la suite de l'éducation qu'on imagine aisément. Voici seulement quelques remarques dont nous verrons l'intérêt.

L'espace pour elle est « un grand trou vide que la main peut sillonner en tous sens et où l'on peut s'avancer toujours sans rencontrer d'obstacles » : c'est à peu près de même que nous l'imaginons. L'étendue est pour elle une propriété des corps, c'est la continuité de la résistance qu'ils nous opposent : je ne vois pas ce que nous pourrions dire de mieux. Sa représentation du temps résulte des événements qui se sont succédé et des efforts qu'ils ont exigés d'elle. L'avenir lui paraît plus ou moins lointain suivant qu'il implique la possibilité d'actes ou d'efforts plus ou moins nombreux, suivant qu'il correspond à un chemin parcourable plus ou moins long : encore une fois c'est ainsi même que nous nous représentons le temps, en y joignant bien entendu des représentations visuelles, d'aiguilles mobiles sur un cadran, par exemple.

Elle demande un jour qu'on lui explique le sens du mot *vieux.* On lui permet de palper la plus vieille des sourdes-muettes ses compagnes. Elle est étonnée des rides et se fâche quand on lui dit qu'elle vieillirait; elle ne l'admet qu'avec la restriction que « ce serait plus tard, plus tard, quand j'aurai marché beaucoup, beaucoup devant moi ».

Conclusion : ses concepts fondamentaux ressemblent tant aux nôtres qu'on est bien forcé de conclure, ainsi que le faisait déjà Aristote (ces questions ne sont pas jeunes) que le toucher est le premier sens, le plus varié, le seul indispensable.

4° — Ceci dit, je conseille au lecteur de parcourir un article de Lachelier, l'illustre philosophe. Il le trouvera dans la *Revue de Métaphysique* pour l'année 1903. Après cette lecture, il comprendra pourquoi je considère nos professeurs de philosophie avec stupeur, et pourquoi, ayant la manie de quitter la métaphysique pour entrer dans l'administration, ils s'y conduisent en parfaits idiots. J'excepte Lachelier, naturellement.

Voici les thèses de Lachelier, l'illustre philosophe.

« L'étendue est un phénomène purement visuel dont le tact réduit à lui-même ne nous donnerait aucune idée. L'exercice du tact nous apprend, d'une manière générale, qu'il y a quelque chose hors de nous; et les différences qualitatives de nos sensations tactiles nous permettent de distinguer, dans ce quelque chose, autant de détails que nous en percevons par la vue. »

Il paraît que pour les philosophes ces propositions ne sont pas contradictoires! Soit; mais pour Dieu, que ces messieurs ne descendent pas de leur panier et ne s'occupent pas d'administrer les pauvres bougres!

37. **Aveugles-nés qui recouvrent la vue.**

1° — Nous sommes au cœur de la question. Par hypothèse un aveugle-né sait tout ce que peut lui apprendre le toucher secondé par l'ouïe et la parole; on lui rend la vue : que ressent-il?

Montrons d'abord à quel point l'expérience est difficile.

Elle n'est pas impossible. De naissance les cristallins peuvent être opaques (*cataracte*), la rétine restant parfaitement saine; l'ablation ou le déplacement des cristallins rend alors à l'aveugle une vue qu'on améliore au moyen de verres convenables.

Mais dans les pays civilisés, l'aveugle est presque toujours opéré en bas âge, à une époque où il est incapable d'expliquer ce qu'il ressent dès qu'il recouvre la vue. La condition posée que l'aveugle sait tout ce que peut lui apprendre le toucher *et en a conscience*, n'est pas satisfaite. Pour donner une certitude à l'expérience, il faudrait, dit Diderot, « que le sujet fût préparé de longue main et qu'on le rendît philosophe. Mais ce n'est pas l'ouvrage d'un moment que de faire un philosophe. »

Ça dépend dans quel sens on prend le mot!

En second lieu tout opéré n'est pas un bon sujet d'étude. Sa rétine étant saine par hypothèse, le cristallin n'étant jamais parfaitement opaque, l'aveugle-né *guérissable* a presque toujours des sensations visuelles, troubles il est vrai, mais capables de fausser l'expérience, comme nous allons le voir. S'il peut avant l'opération reconnaître la silhouette d'un objet placé devant son œil, on ne tire à peu près rien de crucial des observations consécutives à l'opération.

En troisième lieu, les passions religieuses et antireligieuses s'en mêlent, à mon avis, bien sottement. Faut-il répéter que le sensualisme ni le spiritualisme n'ont rien à tirer de ces expériences; au surplus ce serait tant pis pour la doctrine, quelle qu'elle soit, qui aurait peur des faits? Mais allez donc prêcher ce flegme à des gens passionnés!

Bref, depuis près de 200 ans qu'on fait des observations, c'est au plus si l'on connaît une douzaine d'opérés dans de bonnes conditions. Le premier en date fut un enfant de treize ans opéré en 1728 par le chirurgien anglais Cheselden; le plus âgé est la dame du chirurgien Waldrop

(1826) qui avait quarante-six ans; un des meilleurs et des plus récents est l'opéré de Dufour (1875) qui avait vingt ans.

Je transcrirai d'abord en l'abrégeant l'observation de Cheselden (*Phil. Trans.*, 1728). Je reviendrai ensuite sur quelques points.

2° — L'enfant de Cheselden.

Il se prêta difficilement à l'opération. « En connaîtrai-je mieux mon jardin? disait-il; m'y promènerai-je plus librement? N'ai-je pas sur les autres l'avantage d'aller la nuit avec plus d'assurance? » Il n'eût point consenti à l'opération s'il n'eût souhaité de savoir lire et écrire.

On commença par « abaisser la cataracte » d'un de ses yeux.

Quand on supprima le bandeau qui le maintenait dans l'obscurité, les objets lui parurent toucher la surface extérieure de son œil. Voici la raison de cette curieuse localisation. Avant l'opération il n'était point si aveugle qu'il ne distinguât le jour d'avec la nuit; il avait remarqué qu'il cessait de voir la lumière dès qu'il portait la main sur ses yeux. Conformément à la règle posée (§ 33) : *la sensation se localise là ou se rencontre sa condition et sa cause*, il contracta l'habitude de localiser la vision au niveau de ses paupières : *il voyait contre son œil.*

Il apercevait tous les objets pêle-mêle et dans la plus grande confusion, quelque différentes qu'en fussent la forme et la grandeur. Il était infiniment loin d'imaginer comment ses yeux pourraient être juges des rapports de grandeur.

N'étant point encore sorti de sa chambre, il disait que quoi qu'il la sût plus petite que la maison, il ne comprenait pas comment elle pourrait le lui paraître à la vue. Lorsqu'on lui montrait des objets qu'il reconnaissait au toucher, il les observait avec soin *pour les reconnaître une autre fois.* Il y apportait d'autant plus d'attention qu'il ne les avait pas d'abord reconnus ni à leur forme, ni à leur grandeur. Mais il avait tant de choses à retenir qu'il oubliait la figure des objets, à mesure qu'il apprenait à en voir d'autres, *objets que du reste il connaissait admirablement au toucher.*

Il fut quelque temps à ne regarder les tableaux que comme des plans différemment colorés (§ 11). Au bout de deux mois seulement ils lui parurent représenter des corps solides : découverte qu'il fit tout à coup. Surpris de ce phénomène, il les regardait, les touchait, et demandait de quel sens il était dupe, du toucher ou de la vue.

Un prodige pour lui fut le portrait en miniature de son père. Cela lui paraissait aussi extraordinaire que *de mettre un muid dans une pinte.* Il n'avait pas encore l'habitude de dissocier la forme et la grandeur d'un objet.

Il fut surpris que les personnes qu'il préférait ne fussent pas les plus belles, et que ses mets favoris ne fussent pas les plus agréables à l'œil.

3° — Perception du relief et de la distance.

La perception du relief et de la distance est relativement très longue à acquérir. Tandis que l'éducation de l'œil au sujet des formes est

rapide (elle ne demande que quelques jours), le nouveau voyant se trompe pendant des mois dans l'évaluation des distances. Mon père me racontait qu'un de ses camarades de pension opéré de la cataracte buttait contre les arbres de la cour de récréation, et cela pendant des semaines.

La dame de Waldrop allongeait le bras pour saisir un objet placé près de son œil, ou cherchait près de sa figure des objets éloignés. Après deux mois l'opéré de Dufour se trompait grossièrement sur les distances quand il s'agissait d'un paysage. L'opéré de Cheselden fut enchanté d'être conduit à Epsom où la vue est très étendue; mais il ne semblait pas se rendre un compte net de ce qu'il voyait.

Sans l'éducation due au toucher, l'œil ne juge ni du relief ni de la distance.

Nous allons voir de quelle manière il juge des formes planes.

4° — Ligne visuelle.

Il nous semble si naturel de *fixer* un objet pour le mieux regarder que nous sommes tout étonnés d'apprendre qu'il nous a fallu pour y réussir des essais multipliés. La dame de Waldrop faisait beaucoup de tentatives inutiles pour diriger son œil sur un objet; lorsqu'elle essayait de regarder un objet, elle tournait sa tête en diverses directions jusqu'à ce que son œil eût *saisi* l'objet à la recherche duquel il s'était mis.

38. **Problème de Molineux.**

1° — Revenons sur un problème célèbre dû au « savant M. Molineux qui emploie si utilement son beau génie à l'avancement des sciences et que je prends la liberté d'appeler mon ami quoique je n'aie pas encore eu le bonheur de le voir », comme dit Locke au livre II de son *Essai sur l'entendement.*

Supposez un aveugle-né présentement homme fait qui sache distinguer au toucher un cube d'un globe. Supposez que, le cube et le globe étant posés sur une table, l'aveugle recouvre la vue. On demande si les voyant sans les toucher, il pourra dire quel est le globe et quel est le cube.

La réponse de Molineux approuvée par Locke est la suivante. Bien que l'aveugle ait appris de quelle manière le globe et le cube affectent son toucher, il ignore que ce qui affecte son toucher de telle ou telle manière, doive frapper ses yeux de telle ou telle manière.

Il ne reconnaîtra donc pas le cube du globe.

Pour Condillac (qui semble avoir raison) cette réponse n'est pas exacte parce qu'elle suppose qu'à l'instant où l'aveugle recouvre la vue, il est capable de discerner le cube du globe, indépendamment des noms à leur appliquer. Or avant qu'il puisse répondre quoi que ce soit, il faut lui laisser le temps de se débrouiller au milieu du chaos visuel.

A ce propos on ne peut que sourire du tableau si fréquemment brossé représentant l'aveugle qui recouvre la vue, stupide d'admiration devant la beauté du monde. A supposer que le monde soit beau, ce qui n'est

pas évident, toujours est-il que l'aveugle mettra quelque temps à découvrir sa magnificence.

2° — L'expérience confirme la théorie de Condillac : les observations sur l'opéré de Dufour sont concluantes.

Après l'opération, il se meut comme un aveugle au point que Dufour croit que la guérison n'a pas eu lieu. Le second jour des expériences, on lui présente une montre du côté du cadran : *il voit quelque chose de blanc*, mais il ne peut dire si cette tache est ronde ou carrée, bien qu'avec ses doigts il sache faire un carré et un rond. Le troisième jour on lui permet de toucher la montre, qu'il reconnaît pour un rond et pour une montre.

On lui présente alors deux papiers rectangulaires allongés de 10 et de 20 centimètres de longueur. Il reconnaît des objets blancs, *mais il ne sait pas distinguer quel est le plus long*. Au toucher toute incertitude disparaît.

On lui présente deux papiers, l'un rond, l'autre carré : il est incapable de dire quel est le carré, quel est le rond. Après toucher il devient définitivement capable de distinguer les ronds des carrés. Pour une raison quelconque, la forme de la montre ne s'était pas gravée dans sa mémoire.

3° — Voici qui est encore plus étrange.

Le premier jour des expériences Dufour fait asseoir son patient le dos à la fenêtre. Il se place devant lui à deux pas et imprime à sa main *bien éclairée* des oscillations de 40 centimètres sur fond noir. Interrogé, le patient répond *qu'il voit quelque chose de clair. Interrogé s'il voit quelque chose qui bouge, il se contente de répéter sa première réponse.*

Condillac avait énoncé que sa statue bornée au sens de la vue n'a l'idée ni de situation ni de mouvement; cette opinion paraît d'abord difficile à soutenir puisque la rétine est étendue (§ 32). *Elle est cependant confirmée par l'expérience précédente.* Ce qui prouve avec quelle précaution il faut raisonner en ces matières et que l'opinion la plus simple en apparence n'est pas nécessairement la vraie. Imaginons un homme paralytique de naissance, qui aurait seulement une sensibilité tactile, tous les autres sens étant supprimés; de ce que les sensations tactiles se produiraient sur une surface gauche (celle de son corps), aurait-il pour cela les notions d'espace et de mouvement? Évidemment non. C'est précisément ce que l'expérience indique pour l'œil.

39. Éducation des aveugles-nés.

Fort heureusement le cas précédemment étudié des aveugles sourds et muets n'est pas le cas général. Le plus souvent l'aveugle entend et parle, ce qui facilite singulièrement son éducation. Il me paraît utile de donner quelques précisions à cet égard, les erreurs grossières sur le rôle indispensable de la vision pour la vie intellectuelle étant trop fréquentes encore. On s'imagine les aveugles comme entièrement

séparés du monde des voyants, ce qui est faux et malheureusement préjudiciable aux aveugles mêmes.

1° — Depuis que le monde existe, il y a des aveugles; ils sont même proportionnellement plus nombreux chez les peuples pour lesquels l'hygiène et la propreté sont rudimentaires : la cécité est une plaie du monde arabe. Depuis toujours les aveugles cherchent à diminuer les inconvénients de leurs ténèbres. Mais c'est à Valentin Haüy (le frère du minéralogiste René Haüy) qu'on doit le premier effort pour coordonner leurs menues trouvailles antérieures.

Il partit de ce fait que les renseignements dus au toucher se multiplient chez les aveugles : il songea donc à leur apprendre à lire par les doigts. Il remarqua que l'épreuve d'imprimerie *à la brosse* (obtenue en frappant le papier avec une brosse) porte au verso un relief assez accentué. Il fit donc fondre des caractères *directs* (et non retournés, § 387); il imprima dessus *sans encre*, mais avec du papier mouillé et après interposition de feutres permettant le *bourrage*. Il obtint ainsi un gaufrage (à propos du clichage, voir le § 397) que son élève Lesueur (celui que montre à ses pieds la statue bien connue) apprit à lire en quelques mois.

Ceci se passait vers 1783.

Il avait ainsi résolu le problème de la lecture; mais il échoua sur celui de l'écriture. Les aveugles peuvent à la rigueur écrire à la mode ordinaire en se servant pour leur main de guides convenables; mais ils sont incapables de se relire faute de relief.

Je ne retracerai pas les vicissitudes de l'école fondée par Haüy qui mourut en 1822 retiré et parfaitement dédaigné.

2° — Ce fut l'aveugle Braille qui, vers 1825, donna le second élan à l'éducation des aveugles par l'invention de son alphabet. Les lettres résultent de la combinaison de points alignés verticalement et horizontalement, repoussés avec un poinçon dans du papier fort. On écrit en creux de droite à gauche, on lit en relief de gauche à droite.

Une plaque en zinc est réglée de sillons ($2^{mm},5$ d'équidistance; 1^{mm} de profondeur) et munie d'un cadre de bois. Sur le cadre on adapte une *grille*, lame de laiton percée dans le sens de la longueur de deux bandes de 26 trous rectangulaires, formant deux lignes de 26 lettres. Les bords des trous portent six coches parfois supprimées. La grille est fixée sur le cadre par une saillie du métal entrant dans une série d'entailles creusées dans le bois. Entre la plaque de zinc et la grille, on place le papier épais et résistant. A l'aide d'un poinçon émoussé, on fait au niveau des coches de chaque trou de la grille, le nombre de points nécessaires à la représentation d'une lettre. Quand les deux lignes sont écrites, on reporte la grille plus bas.

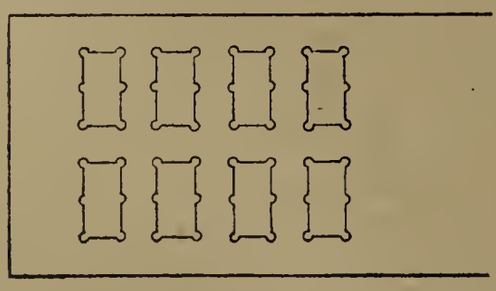


Fig. 36.

L'inconvénient de ce système est d'être relativement lent, d'occuper beaucoup de place (chaque lettre prend $6 \times 11 mm^2$); enfin les livres s'usent par la lecture, quelle que soit la délicatesse du toucher.

La figure 37 donne l'alphabet Braille. Les petits points indiquent la position des coches sur les bords des trous de la grille; les gros représentent les trous de poinçon.

Les dix premières lettres de l'alphabet sont figurées par dix signes

Alphabet Braille

Fig. 37.

comportant de 1 à 4 points, écrits sur les deux premières lignes horizontales. Pour obtenir les signes qui dans la figure sont écrits sous les premiers, on ajoute respectivement, sur la troisième horizontale, un point à gauche, deux points, un point à droite; enfin, pour obtenir la cinquième ligne de caractères, on abaisse d'une ligne les dix premiers. On écrit ainsi par exemple successivement les lettres ou signes *b*, *l*, *v*, *é*, ;.

Les dix chiffres sont figurés par les dix signes fondamentaux qu'on fait précéder du signe *nombre*.

Il y aurait beaucoup à dire, non certes sur le choix de la forme des caractères Braille, mais sur le choix de ces caractères pour représenter telle ou telle lettre. Le principe qui a présidé à l'attribution des combinaisons Morse aux différentes lettres (*elles doivent être d'autant plus simples que les lettres sont plus fréquentes*), n'a pas été appliqué. L'avan-

tage des caractères Braille sur les signes Morses est d'être plus ramassés et de tenir entièrement sous le bout du doigt. La lecture est relativement rapide : cent mots à la minute en moyenne. Cette vitesse correspond à un débit lent à haute voix.

40. **Facultés des aveugles.**

1° — On peut considérer comme également erronées les opinions d'après lesquelles la suppression d'un sens, *par le seul fait de sa suppression*, *émousse* ou *exalte* les sens qui subsistent; l'expérience montre qu'à cet égard les aveugles ne sont ni frustrés, ni avantagés. La nécessité les force à éduquer les sens qui leur restent; ils arrivent à en tirer des renseignements extraordinaires; mais l'outil n'a pas pour cela changé de nature. De ce qu'ils obtiennent de leur toucher ce dont nous sommes habituellement incapables, il faut conclure non pas que leurs doigts ont des propriétés spéciales, mais que nous avons négligé sur les nôtres une éducation que la vue rend inutile.

Les aveugles ne font que ce dont les voyants *éduqués* sont capables. Je me rappelle étant aux Indes mon ahurissement devant un caissier *natif* qui pour me payer 500 roupies, les prit à poignées dans un coffre et *ne compta pas;* au poids il pouvait donc reconnaître le nombre des roupies. Tous ceux qui ne crachent pas dans leurs mains pour feuilleter un livre, savent s'ils tournent deux pages à la fois. Les trieuses de papier acquièrent une délicatesse exquise pour reconnaître l'épaisseur.

Il y a dans ce qu'on raconte sur les aveugles des erreurs manifestes. Ils ne reconnaissent pas la couleur au toucher; ils reconnaissent seulement si une laine a la douceur ou la rudesse d'une laine *dont on leur a dit la couleur*.

2° — Les aveugles tirent de l'ouïe des renseignements que nous négligeons. Nous disons : « Un tel à une sale tête »; ils disent : « Un tel a une voix antipathique ». Parlant d'une femme qu'il avait aimée, un aveugle murmurait : « Ah! quel joli son elle avait! » Ils reconnaissent les gens à la voix; nous aussi.

De toutes les personnes qui viennent me voir au laboratoire, je reconnais le pas; il n'y a rien là que de très ordinaire. Un ouvrier qui surveille un atelier, sait au son quand un outil se détraque : l'éducation nous permettrait d'égaler les aveugles.

Quand ils entrent dans une salle, ils reconnaissent au son si elle est grande, petite, pleine, vide.... Le tonnelier vous dit de même à quel point le tonneau est rempli; quand la nuit je me verse de l'eau dans un verre, je m'arrête avant de dépasser le bord. Faut-il citer Potain qui au son annonçait qu'un enfant encore dans le sein de sa mère avait une péricardite... dont il est mort en naissant! Si nous ne réalisons pas ce qui est possible aux aveugles, c'est que nous n'en avons pas besoin.

3° — Sens des obstacles.

Voici l'expérience classique. Un aveugle se promène dans un cou-

loir. On se poste immobile sur la ligne probable qu'il doit parcourir; arrivé à une distance inférieure au mètre, l'aveugle s'arrête : *il a comme senti une résistance.* Pour que l'obstacle soit reconnu, il doit être à la hauteur de la tête : l'aveugle n'évite pas un banc, une table,... un objet même volumineux placé à la hauteur des genoux ou des hanches.

On discute encore sur l'origine du sens des obstacles. Il semble que l'ouïe y intervient pour tout ou presque tout.

Certes si l'aveugle s'approche d'un poêle ou d'une ampoule électrique, c'est la chaleur qui le prévient; si, longeant un mur continu, il traverse une rue à angle droit, il en est averti par les courants d'air. Mais en général la perception des obstacles ne provient ni d'une variation de température, ni d'une résistance senties par la peau de la face, bien que la sensation soit ordinairement localisée à ce niveau.

Si on bouche soigneusement les oreilles de l'aveugle, le sens des obstacles s'émousse ou disparaît. Un grand bruit le supprime : ce qui n'a rien d'extraordinaire, l'aveugle se sentant alors étourdi et comme perdu; mais il en est de même d'un silence trop profond (sol couvert de neige). Au contraire un bruit monotone, faible et permanent exalte le sens des obstacles.

Il se peut du reste que l'odorat joue son rôle, comme chez les chiens qui, même aveugles, n'en continuent pas moins de chasser. Chez les aveugles *sourds* le sens des obstacles ne saurait guère avoir d'autre origine; mais d'ordinaire ces aveugles ne l'ont que faiblement.

4° — Sens de l'orientation.

Il n'a rien de mystérieux; il est même rudimentaire comparé à celui du pigeon voyageur ou du chien. L'aveugle se sert intelligemment des sens qui lui restent; mais ses facultés ne sont pas extraordinaires. Tout comme les voyants, même en comptant ses pas, il se trompe sur les distances. Assurément il a une mémoire musculaire; mais serait-elle développée par l'éducation, elle reste du même ordre que celle des voyants : ceux-ci n'ont pas besoin de compter les marches de leur escalier pour savoir où ils en sont de leur ascension, les yeux fermés bien entendu.

L'aveugle se dirige donc par la mémoire des particularités du trajet qu'il connaît (pavé, asphalte, gazon, nombre de rues traversées, bruits et odeurs spéciales...). Le pied le renseigne sur les déclivités et les accidents. Au surplus il doit faire plusieurs fois le trajet (dans certains cas la nuit, pour ne pas être distrait dans son étude) s'il veut le posséder de manière à se conduire seul.

41. Imagination des aveugles.

Tout ce que nous venons de dire rapproche l'aveugle-né du voyant; ses facultés sensorielles sont ordinaires, mais il apprend à mieux s'en servir. Il paraît certain que les facultés intellectuelles d'un aveugle-né ne diffèrent pas essentiellement de celles d'un voyant. Je néglige les

théories des illustres philosophes toujours à côté de la question; je me borne aux faits incontestables.

1° — Il est d'abord évident que les aveugles ont des images spatiales.

Dans son amusante mais très superficielle *Lettre sur les Aveugles*, Diderot parle du célèbre aveugle-né Saunderson, qui fut professeur de mathématiques : il « voyait » les figures et savait les combiner. *Il fit même un cours d'optique géométrique.* A ce propos Diderot, infiniment plus intelligent que nos professeurs de la Sorbonne, fait observer qu'au début de toute question physique existe une sorte de géométrie. L'aveugle prend les postulats pour ce qu'on les lui donne : il franchit ainsi le passage de la physique à la géométrie; la question devient purement mathématique. Alors que les phénomènes de la lumière lui sont évidemment inconnus, rien n'empêche qu'il n'étudie la marche des rayons conçus *in abstracto*.

Pour percevoir un objet nouveau, l'aveugle-né prend d'abord plus de temps que nous; mais cela fait, *que l'objet soit un cube ou une rue, il le pense d'un seul coup et se le représente en bloc : l'objet est pour lui un ensemble de lignes de formes déterminées, se coupant sous des angles déterminés.*

Là-dessus tous les témoignages sont concordants.

La difficulté est évidemment grande *pour nous* d'imaginer quelle sorte d'images construisent les aveugles; mais ce n'est pas une raison pour nier l'évidence. Dans son livre sur le *Monde des Aveugles*, Pierre Villey dit à ce sujet des choses très sensées. « On surprend, dit-il, étrangement les aveugles quand on parle de théories philosophiques qui leur refusent la notion de l'étendue ou qui leur accordent une étendue toute différente de celle des clairvoyants. Ils s'en amusent fort... et se demandent... d'où vient qu'aucun malentendu n'en résulte jamais dans leurs rapports avec les clairvoyants.... Je me persuade donc que le clairvoyant et l'aveugle se comprennent réellement et non en apparence, lorsqu'ils se communiquent leurs idées au moyen des mots d'espace, de dimensions, de forme, de distance; qu'ils se servent, pour y projeter leurs images, de la même étendue, à cette seule différence près que l'étendue du clairvoyant est toujours colorée, tandis que celle de l'aveugle est toujours prête à se charger d'impressions tactiles plus ou moins vives.

« Du moins en pratique tout se passe comme s'il en était ainsi. »

Ce qui évidemment suffit au physicien qui se soucie de la métaphysique comme d'une nèfle, et qui par-dessus le marché, ne peut pas ne pas être empiristique, c'est-à-dire dans le cas particulier, ne pas attribuer l'éducation de l'œil au toucher.

Pierre Villey, aveugle à quatre ans (il est bon d'observer qu'il a vu, se rappelle avoir vu et même se rappelle une image en particulier), agrégé de l'Université, docteur ès lettres, auteur d'un travail estimé sur *les Sources de Montaigne*, a droit à toute notre créance *quand il parle de son état*, à la restriction de la parenthèse précédente. On s'en méfiera

seulement quand il parle de géométrie non euclidienne, de géométrie à quatre dimensions, ou qu'il nous apprend que l'opinion que « la vue ne perçoit pas directement l'espace... semble être abandonnée aujourd'hui *avec raison* par presque tous les psychologues ». Cela prouve simplement que les psychologues ne savent pas de quoi ils parlent. En tout cas, il faut une singulière tournure d'esprit pour écrire 80 pages sur les images spatiales et leur acquisition chez l'aveugle, pour conclure qu'elles sont de même nature que chez le voyant — et repousser en une phrase, pas davantage, la seule théorie qui explique la chose en faisant dériver du toucher toutes les notions spatiales, y compris celles du voyant. Heureusement cette théorie a pour elle une infinité d'arguments dont nous discuterons par la suite un très grand nombre.

2° — Suivons Villey dans l'analyse qu'il fait de la formation d'une « image ». Il remarque d'abord avec raison que les images ne sont pas les exactes reproductions de la sensation ; ne concluons donc pas que, l'aveugle ayant exploré le monde extérieur seulement par le toucher, ses images conserveront nécessairement les caractères des sensations tactiles et musculaires qui les ont engendrées. En cela Villey se retrouve avec Helmholtz (dont il n'a pas l'air de connaître l'existence), quand Helmholtz, comme simple résultat d'expérience, dit que nos sensations sont livrées à notre intelligence.

Quand l'aveugle insiste sur la nature de sa représentation, il finit par évoquer à l'origine de cette représentation des impressions tactiles et musculaires sur lesquelles l'intelligence a travaillé. Mais en dehors de cet effort d'analyse, quand il se représente un objet, il ne songe pas plus aux muscles de sa main que le voyant aux muscles de ses yeux; il a dépouillé sa représentation des procédés qui ont servi à la construire. L'objet se détache dans sa conscience comme une forme, une forme concrète, une forme *dessinée*. L'aveugle dispose d'images étendues, synthétiques; dans son cerveau surgissent des apparitions, libres de toute impression musculaire ou tactile *consciente*, apparitions que seul le mot *vue* peut caractériser. Certes elles sont moins riches, moins complexes, moins étendues que les images visuelles; mais elles sont, comme elles, unes et multiples à la fois, perçues d'un coup tout entières et jusque dans leur détail. Une ligne droite apparaît comme une droite, et non pas (ainsi que le voulait Diderot) comme une suite de sensations tactiles disposées le long d'un fil tendu.

42. Conquête des représentations spatiales.

Villey analyse d'une manière intéressante la conquête des représentations spatiales chez les aveugles. Pourquoi faut-il qu'il débute par l'affirmation gratuite que « si l'espace de l'aveugle se présente avec les mêmes caractères essentiels que l'espace des voyants, *il est clair* qu'il est acquis par des moyens très différents ». Pour savoir ce qu'il faut penser des aveugles, j'ai le « bon sens » de leur demander leur avis;

les aveugles seraient prudents de ne pas nous apprendre ce que nous devons à nos yeux, quand nous, voyants, avons, pour nous créer une opinion mûrie, des milliers de faits bien catalogués. Assurément si Villey a transcrit Montaigne en braille, il n'a pas transcrit Helmholtz.

Villey veut-il simplement dire qu'une fois l'éducation de nos yeux faite par le toucher, nous substituons l'atlas visuel à l'atlas musculaire et tactile? C'est l'opinion de Condillac, d'Helmholtz et de Taine, c'est du reste évident. Mais, comme sa phrase le suppose, s'il admet une différence *initiale* dans les procédés d'acquisition de la notion d'espace, nous ne sommes plus du même avis.

Quoi qu'il en soit, les parties du corps les plus sensibles au toucher sont la langue et le bord rouge des lèvres; aussi les enfants portent-ils les objets à leur bouche. Peut-être faut-il expliquer ainsi la manière dont l'aveugle de Diderot enfilait les aiguilles, mettant le chas entre ses lèvres et aspirant le fil. Mais c'est surtout à la main que l'aveugle s'adresse : la peau de l'index et du médius constitue un instrument tactile fort précis; le pouce venant en opposition donne un appareil excellent pour mesurer les épaisseurs.

Villey cite une illusion analogue à celles que nous verrons pour l'œil : un cube en bois pris dans la main est jugé plus petit qu'un cube en papier; l'effort suscité par la résistance du bois fait paraître plus étendus les mouvements de contraction de la main.

Les mouvements de palpation sont rapides chez l'aveugle.

En dehors de l'espace *manuel* vient l'espace *brachial*, espace dont l'exploration exige le mouvement des bras; la précision devient moindre et la représentation exacte plus difficile. Pendant que la main palpe et considère séparément les diverses parties, le bras fait la synthèse. En raison de la longueur et de la difficulté de l'opération, l'aveugle se contente le plus souvent d'un examen partiel d'où il conclut l'ensemble tant bien que mal.

S'il sort de l'espace brachial, la difficulté s'exagère, la précision diminue. Toutefois son corps lui servant de terme de comparaison, l'aveugle se fait aisément et presque d'un coup l'idée d'un fauteuil, d'une chaise.... Le nombre des pas et leur orientation le renseignent sur la forme d'une pièce et la disposition des meubles.

Dans la conquête des représentations spatiales l'aveugle s'aide de l'ouïe.

Il est amusant de voir Villey qui parle de Condillac et de Taine avec un dédain non dissimulé, faire à propos de l'ouïe *auxiliaire du toucher* exactement les mêmes raisonnements que nous sommes conduits à faire à propos de la vue. « C'est donc l'espace tactile encore, dit-il, que les sensations auditives offrent à l'aveugle, l'espace tactile qu'elles se sont incorporé en quelque sorte; et, s'il ne possédait pas auparavant l'espace tactile, il n'en tirerait aucun fruit dans le champ de ses représentations spatiales. Elles ont sur les représentations tactiles le grand avantage de

s'étendre sur un domaine considérablement plus vaste que le toucher.... Instruite par le toucher, l'ouïe usurpe ses prérogatives. Le bruit d'une fontaine m'épargne les quinze pas qu'il eût fallu pour apprendre qu'elle est à dix mètres devant moi. » C'est exactement l'idée que développe Taine quand, après Helmholtz, il dit que « les sensations rétiniennes et musculaires de l'œil deviennent des signes abréviatifs ».

Qu'il serait donc avantageux pour tout le monde que les aveugles ne parlassent pas des couleurs!

43. Les sensations visuelles sont des signes.

1° — Nous pouvons maintenant comprendre ce que signifie l'énoncé d'Helmholtz : « Les sensations visuelles sont des signes que l'expérience nous apprend à interpréter ». Les sensations ne sont en fin de compte que des modifications de l'encéphale; des tâtonnements plus ou moins longs nous amènent à les considérer comme le symbole de certaines circonstances extérieures; nous créons par utilité une correspondance entre les modifications du cerveau et les objets; *nous objectivons ces modifications.*

A priori n'existe entre le signe et la chose signifiée aucune relation de forme, pas plus qu'entre le mot *cheval* et l'animal dont ce mot évoque l'image. C'est une idée puérile que d'imaginer l'âme regardant la rétine pour y voir se peindre le monde extérieur.

Quand l'enfant tend les mains pour saisir l'objet qu'il voit, il essaie de déchiffrer le rébus que lui propose la sensation rétinienne. Il compare les sensations tactiles avec les sensations visuelles, afin de se créer une représentation du monde extérieur nécessaire pour sa vie de tous les jours, représentation qu'on appelle *exacte.* Comme dit Taine, il essaie de substituer à l'atlas musculaire et tactile, un atlas visuel *plus commode.*

2° — On demande parfois pourquoi, les objets se peignant renversés sur la rétine, nous les voyons droits. La question disparaît d'après ce qui précède; peu importe l'orientation des images sur la rétine, peu importent leurs déformations (§ 18), puisque nous n'avons aucune idée de notre rétine et qu'elle est pour nous comme si elle n'existait pas. Voici comment Helmholtz précise sa thèse : « Je crois probable que la figure, la forme et la position de la rétine véritable, ainsi que les déformations de l'image rétinienne, sont absolument indifférentes pour la vision, pourvu que l'image soit nette dans toute son étendue, et que la forme de la rétine et celle de l'image restent sensiblement invariables d'un moment à l'autre. »

CHAPITRE IV

VISION BINOCULAIRE

Phénomènes généraux.

44. Préliminaires.

La question de la vision binoculaire a fait couler des barils d'encre. C'est un admirable champ clos où *empiristes* et *nativistes* se sont jadis distribué des horions glorieux.

Nous avons *deux* rétines, pourtant nous voyons *simple*.

Les *nativistes* soutiennent que les points des rétines sont liés deux par deux de telle façon que rien ne permettrait au nouveau-né de distinguer les sensations qui proviennent de ces points. Aussi disent-ils que les points sont *identiques*. Ils ont même soutenu qu'il existe entre eux une liaison anatomique grâce au *chiasma*, c'est-à-dire à l'entre-croisement des nerfs optiques au niveau de l'occiput.

Pour les nativistes, les sensations dues aux points correspondants des deux rétines sont non pas fusionnées, mais identiques.

Les *empiristes* soutiennent au contraire que la fusion est le résultat de l'éducation. Pour Helmholtz, le *contenu de chaque champ visuel arrive à notre conscience sans être lié par une disposition organique à celui de l'autre; la fusion des deux champs visuels en une image commune (en tant qu'elle se produit) est un acte psychique, le résultat de l'éducation.*

Le débat dure depuis longtemps. Il a pris son caractère passionné, parce que, comme toujours, on y mêle des questions religieuses et métaphysiques qui lui sont étrangères. Pour mon compte, je ne distingue pas ce que le spiritualisme ou le sensualisme, en tant que doctrines désintéressées, ont à gagner ou à perdre la solution d'un problème qui se pose *actuellement* d'une manière si compliquée par l'hérédité, qu'il n'a plus qu'un intérêt professionnel pour les physiciens et les oculistes.

Dans son très intéressant *Manuel du Strabisme*, Javal, cependant grand admirateur de la prodigieuse *Optique Physiologique* d'Helmholtz, s'efforce de corriger ce que les affirmations de son maître ont de trop absolu. Après Donders, il prend une position intermédiaire que rendent nécessaires nos idées actuelles sur l'importance de l'hérédité.

Comme nous le disons au § 30, le problème actuel n'est plus entier, nous ne raisonnons pas sur Adam. L'*intellectus ipse* de Leibnitz s'impose aujourd'hui à toutes les doctrines, quoi qu'il en fût chez notre premier père. Au surplus nous ne pouvons soumettre à nos expériences que l'homme actuel.

Voici ce qu'avec bon sens dit Javal : « Étudiant l'observation de l'aveugle de Cheselden et d'autres relations analogues, le lecteur qui n'a pas de notions philosophiques, est surpris de l'impuissance absolue de ces sujets à reconnaître quoi que ce soit par la vue, tant qu'ils n'ont pas appris, par le secours du toucher, à interpréter les impressions rétiniennes. Au contraire, ceux qui ont une notion nette des processus psychologiques, sont amenés à reconnaître qu'il existe soit un mécanisme préétabli, soit au moins une réminiscence *qui se manifeste par la rapidité avec laquelle se fait l'éducation de la perception visuelle.* » Une éducation est nécessaire; elle est si rapide qu'on doit admettre qu'elle est préparée : telle est la fusion pratique des doctrines ennemies. La vision binoculaire est acquise et innée tout à la fois; notre tâche ne peut être que d'essayer le départ entre ce que nous devons à *l'expérience individuelle* et ce que nous devons à *l'expérience héréditaire*, à *l'expérience collective de l'espèce.*

Quant à l'empirisme et au nativisme sous leurs formes étroites et surannées, laissons-les aux professeurs de philosophie.

45. Distinction entre les sensations des yeux. Vision binoculaire.

1° — Quand nous touchons un objet, nous savons toujours avec quelle main; quand nous regardons un objet, nous n'avons généralement pas conscience de l'œil qui nous sert. Les yeux étant à une certaine distance l'un de l'autre, un obstacle (un barreau de fenêtre par exemple) supprime pour chacun d'eux une partie différente du champ visuel : nous sommes généralement incapables de savoir ce qu'il en est, à moins de fermer alternativement les yeux. C'est au point qu'on cite des malades ayant quasiment perdu l'usage d'un œil et ne s'en apercevant que par hasard; sans parler des innombrables strabiques qui n'utilisent à la fois qu'un de leurs yeux, et cela depuis très longtemps, sans en avoir jamais eu conscience.

Toutefois dans certains cas nous rapportons plus ou moins distinctement la sensation à l'un des yeux. Les personnes qui portent constamment des lunettes, reconnaissent quel est le verre sale. Javal cite certains de ses clients qui conservaient parfaitement nette la conscience que telle sensation leur venait de tel de leurs yeux.

Cette conscience est ordinairement abolie parce qu'elle est inutile; les exemples précédents prouvent qu'elle se réveille lorsqu'elle redevient utile.

2° — Pour déterminer si nous sommes capables de voir avec les deux

yeux, il suffit de fermer alternativement l'un ou l'autre. Il est plus difficile de savoir si nous utilisons *simultanément* les deux yeux, ce en quoi consiste la *vision binoculaire*.

Voici le test le plus simple. On met des bésicles dont un verre est rouge, l'autre vert; on cherche à lire un texte dont les caractères sont rouges et verts. Il est bon de percer les lettres dans une plaque métallique et de recouvrir les trous avec des verres colorés qu'on éclaire par derrière. La vision est *binoculaire* si on voit le texte ininterrompu; quand on n'utilise qu'un des yeux, on ne voit qu'une partie des caractères.

46. Diplopie homonyme, diplopie croisée.

1° — Il y a *diplopie* quand l'objet est vu double. Pénétrons-nous de cette vérité que *nous voyons toujours doubles presque tous les objets;*

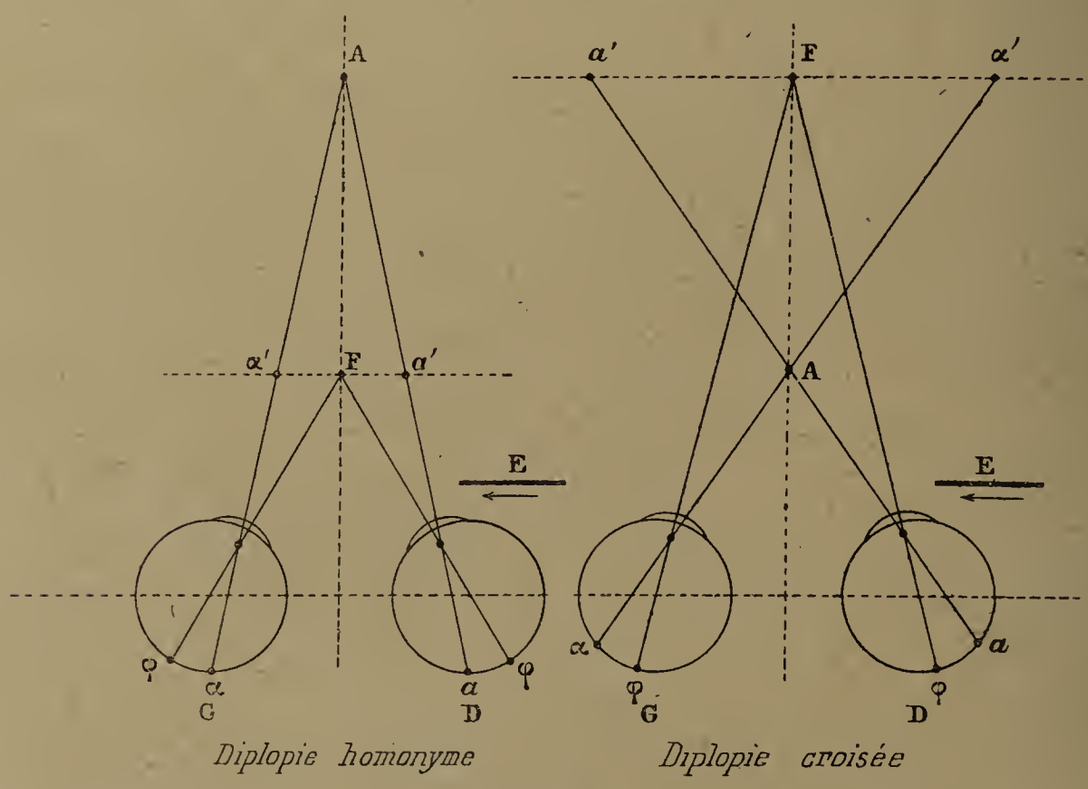


Fig. 38.

les objets que nous voyons simples pour chaque point de fixation, sont sur une *courbe* appelée *horoptère*.

Une expérience, facile à répéter, conduit à la définition de la *diplopie homonyme* et de la *diplopie croisée*. On fixe le point F; les images φ se forment sur les *foveas* des deux rétines; nous verrons que les *foveas* se correspondent.

Quelle que soit la distribution des autres points correspondants sur les rétines, toujours est-il que les points qui sont respectivement à droite, à gauche, au-dessus, au-dessous de la *fovea* de l'une sont également à droite, à gauche, au-dessus, au-dessous de la *fovea* de l'autre.

Ceci posé, fixons le point F; le point A plus proche ou plus éloigné

est nécessairement vu double, puisque l'image a est d'un côté de φ, et l'image α de l'autre côté.

Le point A est projeté en a' et α' dans le plan de F.

Il y a *diplopie homonyme* ou *directe* si la projection a' due à l'œil droit est à droite de F; si la projection α' due à l'œil gauche est à gauche de F. C'est ce qui arrive quand le point A est plus éloigné que le point de fixation F.

Il y a *diplopie croisée* ou *inverse* si la projection a' due à l'œil droit est à gauche de F; si la projection α' due à l'œil gauche est à droite de F. C'est ce qui arrive quand le point A est plus proche que le point de fixation F.

Pour réaliser l'expérience, on utilise deux bougies disposées par rapport aux yeux comme les points A et F. On fixe l'une d'elles : l'autre est vue double. Avec un écran E déplacé dans le sens de la flèche, on détermine quelle image appartient à chacun des yeux.

2° — Voici une manière intéressante de faire l'expérience.

Sur la planche P on trace deux traits O_1F, O_2F, tels que $\overline{O_1O_2}$ soit égal à l'écartement des pupilles.

En F on plante une épingle, puis en B et C deux autres épingles. On fixe l'épingle F. On voit une autre épingle *plus grosse* coïncidant avec F : c'est la résultante des images B_2 et C_1 des épingles B et C vues doubles. Les autres images B_1, C_2, apparaissent latéralement : il y a *diplopie croisée.*

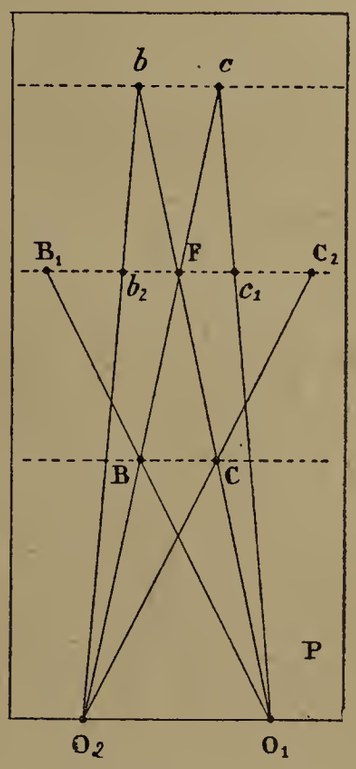


Fig. 39.

On peut répéter l'expérience en plaçant les épingles en b et c; l'épingle résultante est alors plus petite que F. Il y a *diplopie homonyme.*

Dans ces expériences les images latérales B_1, C_2; b_1, c_2; apparaissent de même grandeur et à la même distance que l'épingle fusionnée B_2, C_1; b_1, c_2. Cela résulte de ce qu'en général *quand les yeux regardent attentivement un objet, les autres objets vus simultanément paraissent à la même distance.*

47. Diplopie expérimentale.

La vision simple des objets fixés étant due à une éducation (rendue plus facile par l'hérédité), chaque fois que nous sortons des conditions habituelles nous voyons double.

C'est ce que prouve l'expérience vulgaire.

1° — Avec le doigt exerçons sur le bord de l'un des yeux une pression suffisante : les images doubles apparaissent. La raison est que nous avons changé la situation relative d'une des rétines par rapport à l'autre. Si le doigt déplace vers le haut la direction de la ligne visuelle (fig. 40,

en bas), l'œil déplacé voit les objets plus bas qu'ils ne sont. En effet l'image du point A se fait au point β de la rétine déplacée, point qui correspondait à la direction descendante βB dans la position normale de l'œil (fig. 40, en haut).

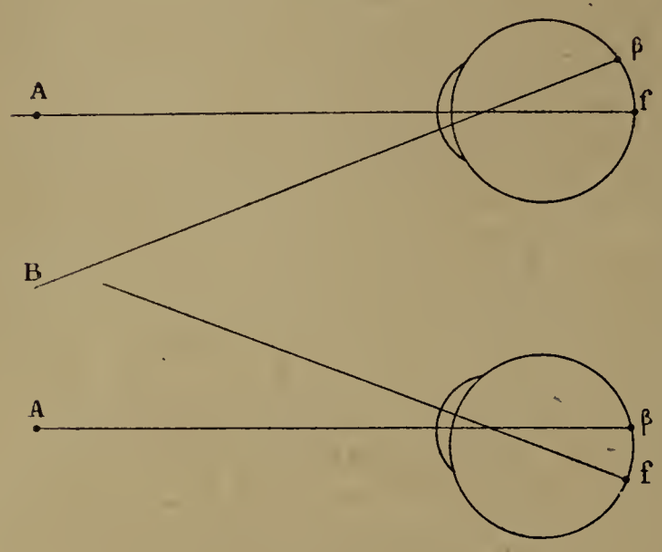


Fig. 40.

2° — Utilisons un prisme P de quelques degrés. Pour éviter les phénomènes dont nous parlerons tout à l'heure, plaçons le prisme devant l'œil, l'arête horizontale est, par exemple, tournée vers le bas (fig. 41). L'œil que nous recouvrons, voit le point A transporté en A′ vers le bas. L'image de l'autre œil n'étant pas déplacée, il y a diplopie.

3° — Ceux qui savent loucher, dédoublent à volonté les images visuelles. Il est généralement beaucoup plus facile de loucher en dedans qu'en dehors; ce qui revient à dire que les muscles droits internes sont plus directement soumis à la volonté que les droits externes. On se rappellera que la propriété physiologique fondamentale des muscles est leur *contractilité*, changement de forme avec tendance au rapprochement des points d'attache; de sorte que l'action des muscles internes est de faire tourner la ligne visuelle vers le nez (§ 27).

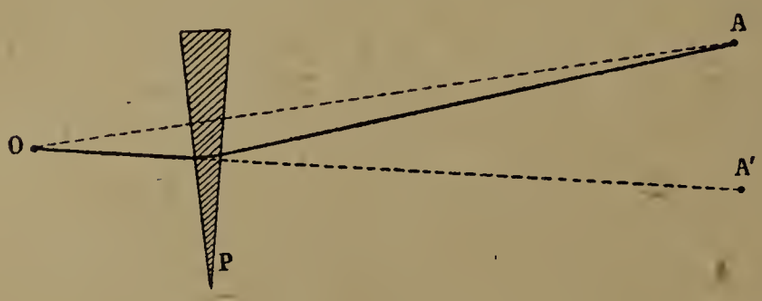


Fig. 41.

Il revient encore au même de dire qu'il est plus facile de faire naître des images doubles homonymes que des images croisées.

Pour comprendre ce qui arrive dans le cas du *strabisme convergent*, le lecteur se reportera à la figure 38 à gauche. Les yeux louchent en dedans, tout se passe comme s'ils fixaient le point F très rapproché; un point quelconque A plus éloigné fournit donc des images doubles *homonymes*. Au contraire le *strabisme divergent* peut être considéré comme l'exagération du cas représenté par la figure 38 à droite : les images doubles sont *croisées*.

48. Tendance à la fusion.

1° — On admet généralement que le nouveau-né voit double tant qu'il n'a pas appris à faire correspondre les points de ses deux rétines. Aussi dans les premiers temps s'exerce-t-il à tourner simultanément les

yeux sur le même objet. Suivant Javal « on ne sait pas d'abord s'il louche ou non, tant les mouvements des yeux sont peu coordonnés; l'enfant passe par une période d'indécision du regard qui dure des jours ou des semaines. Le plus souvent, même quand les muscles moteurs de l'œil n'avaient pas au début des longueurs correctes, la fonction fait l'organe et la vision binoculaire s'établit. »

De même l'adulte s'efforce de fusionner les images; grâce à l'éducation acquise, il surmonte aisément et instantanément certains obstacles qu'on apporte à cette fusion.

Voici des expériences faciles à répéter.

2° — Fixons une bougie B placée à une certaine distance des yeux O; elle est vue simple. Interposons avant l'œil droit un prisme P de quelques degrés; il donne de la bougie une image virtuelle B′. La bougie est vue double. Effectivement l'œil droit continue à regarder en B; l'image de B′ se fait non plus sur la fovea de la rétine de cet œil, mais à droite de cette fovea; tandis que l'image de B continue à se faire sur la fovea de l'œil gauche.

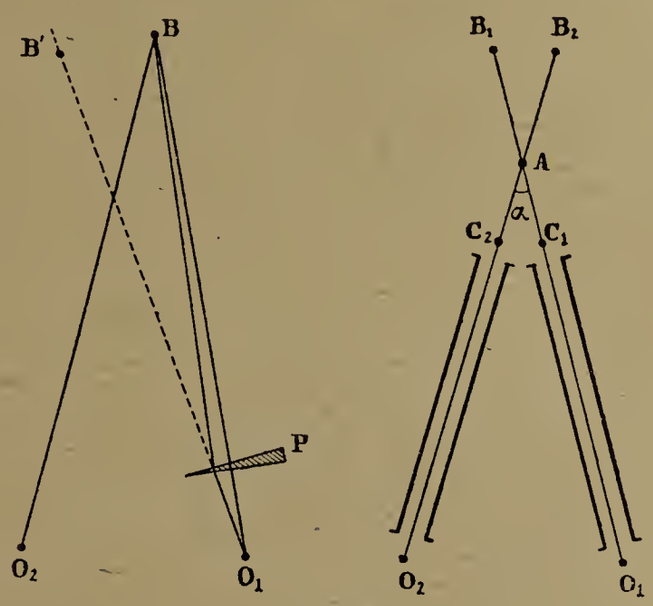


Fig. 42.

Au bout de quelques instants l'œil droit tourne dans son orbite de manière que l'image de B′ vienne sur la fovea : la bougie est de nouveau vue simple. En allant progressivement avec un prisme d'angle variable, on arrive à voir une image unique de la bougie avec une déviation supérieure à 20° : cela correspond à un strabisme convergent considérable.

L'expérience réussit mieux quand on dévie vers la gauche l'image vue par l'œil droit (ou vers la droite l'image vue par l'œil gauche), parce qu'il est plus facile de loucher en dedans qu'en dehors.

Le fusionnement est très difficile pour un déplacement de l'image vers le haut ou vers le bas, preuve que nous n'avons pas de moyen volontaire pour abaisser ou élever une des lignes visuelles relativement à l'autre.

3° — Regardons un objet placé en A à travers deux tubes noircis (fig. 42). Nous le voyons unique et nous habituons nos yeux à cette convergence. Si ensuite nous plaçons deux objets identiques au premier en B_1 et B_2, ou en C_1 et C_2, nous les voyons comme un objet unique.

A la vérité l'habitude établissant un lien entre la convergence et l'accommodation, on éprouve d'abord quelque peine à voir distinctement, sous la convergence α, des objets qui sont plus éloignés ou plus

rapprochés des yeux que le point A. Mais un peu d'exercice dissocie la convergence et l'accommodation dont le lien n'est pas nécessaire (§ 61).

4° — Regardons la figure :

AB BC,

en plaçant un papier noir devant le nez de manière que chacun des yeux ne voie qu'un groupe de lettres. La fusion s'opère; on finit par voir le groupe unique : ABC.

Dans toutes ces expériences on change, non pas la loi de correspondance des points des rétines, mais la relation musculaire qui existe habituellement entre les yeux. C'est par un procédé inverse que les gens qui savent loucher, savent à volonté voir double.

49. **Répulsion des images.**

Généralement il y a *tendance à la fusion*; dans certains cas, c'est le phénomène inverse qui se produit : il y a *répulsion des images*.

Voici comment (d'après Javal) von Gräfe décrit le phénomène. « Après des opérations de strabisme et un redressement satisfaisant, il m'est arrivé plusieurs fois d'assister à l'apparition d'images doubles voisines. L'état antérieur ayant été alternant (§ 64), la vision était également bonne des deux côtés, il n'y avait pas d'inégalité d'accommodation. Cependant il était impossible de provoquer la vision simple. Quelque soin qu'on apportât au moyen de prismes à supprimer les différences de hauteur, les images s'échappaient l'une de l'autre. Il semblait qu'il y eût une tendance diamétralement opposée à la tendance ordinaire d'après laquelle il suffit d'un rapprochement des images reçues par des yeux sains, pour provoquer des contractions musculaires amenant la vision simple. »

L'explication se trouve dans l'impossibilité (pour une raison quelconque) d'amener la fusion *parfaite;* comme la fusion seulement *approchée* est très gênante (§ 50), le malade éloigne les images en louchant tant qu'il peut. C'est donc là un phénomène actif.

50. **Neutralisation totale ou partielle d'un champ de vision.**

1° — La *neutralisation* est le phénomène par lequel nous abolissons la *perception* d'un des champs de vision, pour supprimer une confusion due à la diplopie ou à toute autre cause. Elle est ordinaire chez les strabiques.

Voici à peu près comment Buffon (qui louchait) décrit ce phénomène : « De quelque côté qu'on tourne le mauvais œil, il ne laisse pas d'admettre des images qui doivent un peu troubler la netteté de l'image reçue par le bon. Mais ces images n'ayant rien de commun, ni par la grandeur ni par la figure, avec l'objet sur lequel est fixé le bon œil, la sensation est beaucoup plus sourde que ne serait celle d'une image semblable.

« Mon œil droit étant un peu plus faible que le gauche, pour lire de petits caractères je ne me sers que du gauche; en utilisant simultanément les deux, je vois toutes les lettres mal terminées. Quand je tourne l'œil droit pour ne me servir que du gauche, l'image due à l'œil droit tourne et se sépare de l'image de l'œil gauche. La séparation n'est pas plutôt obtenue, que l'image du gauche devient très nette et très distincte. L'œil droit étant dirigé sur un endroit du livre différent de celui que fixe l'œil gauche, cet endroit paraît dans un plan différent; son image n'ayant rien de commun avec celle de gauche, ne la trouble en aucune manière. Si même mon œil droit se porte sur la marge qui est d'un blanc informe, à peine puis-je m'apercevoir, en y réfléchissant, qu'il voit quelque chose. »

En écartant l'œil faible, l'objet prend donc plus de netteté. Il faut admettre que les images différentes de l'objet ne troublent pas la sensation, tandis que les images semblables à l'objet la troublent beaucoup.

2° — La question est ici posée avec une grande précision. Les deux yeux peuvent voir *séparément* avec une netteté inégale mais suffisante à la rigueur. Soit à cause d'une inégalité d'accommodation, soit en raison de l'astigmatisme d'un des yeux, l'une des images trouble la vision de l'autre. Dès que les images sont suffisamment écartées, *la perception de la moins bonne est abolie; il y a neutralisation d'un des champs de vision.*

Le phénomène n'a rien que d'ordinaire. Les locataires des loges à l'Opéra caquettent sans entendre qu'on fait de la musique dans la salle; elles ne le perçoivent que si le premier violon cesse sa chanterelle ou si le cymbalier lâche un de ses disques. Nous autres, pauvres diables qui sommes au parterre, supprimons la perception des raclements qui accompagnent nécessairement le son du violon.

Pour en revenir aux yeux, nous arrachons d'un bel édifice les cheminées qui le déparent; le micrographe ayant l'œil droit sur son microscope, laisse le gauche ouvert et ne s'occupe pas de ce qu'il regarde. Bref nous avons une admirable facilité pour ne pas voir ce qui nous déplaît. Comme dit le proverbe, il n'est pire sourd que celui qui ne veut pas entendre. Mais ce que le proverbe ne dit pas, c'est que le sourd volontaire finit par ne pas entendre mieux qu'un sourd véritable. C'est pourquoi il est si difficile de persuader à ceux qui s'imaginent diriger l'Université, qu'ils ne sont que des ânes : il faudrait d'abord qu'ils vous entendissent.

Nous retrouverons la neutralisation en parlant du strabisme.

Points correspondants.

51. Définitions. Plan du regard. Horizons rétiniens.

1° — Quoi qu'il en soit de l'origine de cette propriété, toujours est-il que *les points des rétines se correspondent deux par deux, indépen-*

damment de la position actuelle des yeux dans l'orbite ou de la position de la tête. Un point dont les images se forment sur des points *correspondants* des rétines, est vu simple. Un point dont les images se forment sur des points *disparates*, est vu double.

Le problème est de déterminer la loi de correspondance.

Précisons le langage dont nous allons nous servir.

La *fovea* et le point nodal postérieur de l'œil déterminent une droite D; la droite parallèle passant par le point nodal antérieur est la *ligne de visée* ou *ligne visuelle.*

Tout plan passant par la droite D est un *méridien* de l'œil; nous assimilerons sa trace sur la rétine à une droite qui sera un *méridien* de la rétine. A tout plan méridien de l'œil correspond un plan parallèle passant par le point nodal antérieur de l'œil. Tout point d'un tel plan a son image sur le méridien correspondant de la rétine. Si, pour abréger le langage, nous confondons les points nodaux en un centre optique, nous pouvons appeler méridien de l'œil un plan passant par la ligne de visée; il coupe la rétine suivant une droite passant par la fovea.

2° — Premières lois de correspondance.

Les foveas se correspondent.

Un méridien M_1 de l'une des rétines a pour correspondant un méridien M_2 de l'autre. Cette dernière loi est fort loin de résoudre le problème : il nous manque la loi de correspondance des méridiens entre eux, et la loi de correspondance des points de deux méridiens correspondants.

Autrement dit, soit θ_1 et θ_2 les angles des méridiens avec des directions de repère; soit ρ_1 et ρ_2 les distances aux foveas des points de ces méridiens. Il nous manque les deux fonctions :

$$f(\theta_1, \theta_2) = 0, \qquad \varphi(\rho_1, \rho_2) = 0.$$

3° — Plan du regard. Horizons rétiniens.

Commençons par définir deux méridiens *correspondants* qui serviront de repères ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$).

Fixons le point de l'espace F. Soit C_1 et C_2 les centres optiques des yeux. Les lignes visuelles C_1F, C_2F, déterminent le *plan du regard.*

Puisque ce plan est assujetti à passer par les centres optiques ou, ce qui revient pratiquement au même, par les points autour desquels tournent les yeux (*points fixes dans la tête*), sa détermination par rapport à la tête ne dépend que d'une seule variable (angle ascensionnel α du § 29).

Le plan du regard coupe les rétines suivant des méridiens M_1 et M_2 *qui généralement ne se correspondent pas.*

L'expérience montre qu'il existe un plan du regard tel que les méridiens M_1 et M_2 se correspondent; on les appelle *horizons rétiniens.*

Ainsi les *horizons rétiniens* sont les intersections des rétines par un plan de regard tel que toutes les droites de ce plan sont vues simples.

52. **Correspondance des deux foveas.**

1° — Les foveas se correspondent; en d'autres termes, nous voyons simples les objets dont les images *binoculaires* se forment sur les *foveas.*

Cette proposition a été la cause d'une infinité de discussions : expliquons ce qu'elle signifie.

C'est l'étude du strabisme (voir plus loin §§ 61 et suivants) qui fixe nos idées. Voici une observation typique.

Un strabique convergent, alternant, subit le même jour la section des muscles droits internes. Aussitôt après le débridement des muscles, les foveas se portent vers le point de fixation *qui est vu simple.* Avant l'opération le patient neutralisait une des images; en réalité il n'utilisait simultanément qu'un œil. S'il s'était servi à la fois des deux, il aurait vu double. Mais son strabisme étant alternant, il avait conservé la faculté de fixer : conséquemment, dès que la ténotomie permit le fonctionnement normal de ses yeux, il fixa *binoculairement* le même point *qu'il vit simple.*

Les yeux ont une tendance *naturelle* à se diriger de manière que les images du point fixé tombent simultanément sur les foveas. Nous sommes donc conduits à admettre la correspondance *innée* des foveas; ce qui, répétons-le, ne gêne en aucune manière la théorie empiriste, en raison des idées actuelles sur l'hérédité. Nous nous retrouvons avec stupeur les gestes que nos parents avaient au même âge et dont nous avions perdu jusqu'au souvenir; pourquoi ne pas admettre une tendance particulièrement utile se transmettant de père en fils après une longue période de stabilisation?

2° — Voici maintenant le problème longtemps litigieux.

Un strabique peut-il créer une fovea *vicariante*, une fovea *auxiliaire?* On l'a cru longtemps et l'on donnait le fait comme une preuve cruciale de la correspondance *empirique* des points des deux rétines.

Mais les phénomènes ont une tout autre interprétation.

Un strabique alternant fixe un point A avec l'œil gauche (fig. 43); pour ne pas voir double, il neutralise la sensation de l'œil droit. Supposons que brusquement et *sans mouvement des yeux*, il porte son attention sur l'œil droit : il voit le point A en vision indirecte.

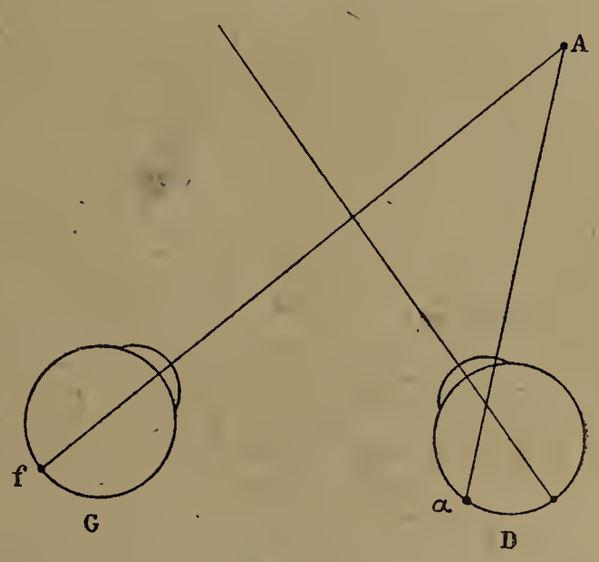


Fig. 43.

Pour éviter la diplopie, il apprend à *projeter correctement* cette image indirecte, c'est-à-dire à la localiser là où se trouve l'objet A. On ne peut pas dire qu'il fusionne les deux images *f* et α, puisqu'il n'en voit jamais qu'une à la fois; sa vision ne cesse pas d'être monoculaire. Il

utilise successivement deux appareils dont, par expérience et par commodité, il parvient à raccorder les indications, à les localiser extérieurement au même endroit par rapport à son propre corps.

On ne saurait donc ici parler de *points correspondants* pour les rétines, au sens que nous avons défini, *les appareils ne servant jamais ensemble.* Il est incorrect de supposer l'existence d'une fovea *vicariante* α, faisant l'usage de la vraie fovea et correspondant par habitude à la fovea de l'autre œil.

Nous reviendrons sur ce sujet (§ 69); nous chercherons ce qui arrive quand une opération modifie brusquement le strabisme; nous verrons ce que devient et comment se transforme le système de correspondance empirique des sensations fournies par les deux appareils de vision *utilisés successivement.*

53. Hypothèse simple sur la correspondance des points des rétines.

1° — Les lois énoncées au § 51 ne résolvent pas complètement le problème de la correspondance des points des rétines.

Nous avons vu qu'il reste deux fonctions à déterminer :

$$f(\theta_1, \theta_2) = 0, \qquad \varphi(\rho_1, \rho_2) = 0.$$

L'hypothèse la plus simple consiste évidemment à poser :

$$\theta_1 = \theta_2, \qquad \rho_1 = \rho_2.$$

Superposons les foveas, puis les horizons rétiniens : *tous les points qui sont alors superposés, se correspondent.* Prenons comme axes rectangulaires les horizons rétiniens et les droites normales passant par les foveas; les points correspondants ont même coordonnées.

2° — Horoptères.

Le problème des *horoptères* consiste à déterminer, *pour chaque point de fixation,* le lieu des points lumineux vus simples, c'est-à-dire dont les images (nettes ou non) se font sur des points correspondants de la rétine. Il est parfaitement déterminé.

En effet la loi de Listing nous apprend quelles sont les positions des rétines par rapport aux positions primaires, quand on donne le point de fixation.

Joignons deux points correspondants aux points nodaux postérieurs des yeux; menons des parallèles par les points nodaux antérieurs. Si les lignes ainsi déterminées se rencontrent, leur point d'intersection appartient à l'horoptère caractéristique du point de fixation choisi.

Comme les points de l'horoptère sont généralement à des distances de l'œil différentes de celle du point de fixation, ils sont vus simples, mais généralement ne sont pas vus nets.

3° — Horoptère de Muller.

La loi de correspondance simple ci-dessus admise est suffisamment exacte pour les yeux normaux. Le plan du regard R dans lequel sont

les droites vues simples, plan définissant les horizons rétiniens, est alors horizontal, la tête étant placée droite et regardant au loin.

Lorsque le point de fixation se déplace dans le plan R, les horizons rétiniens glissent sur le plan horizontal (§ 29) : il n'y a pas de rotation des yeux.

Dans ces conditions déterminons l'horoptère pour un point de fixation A quelconque du plan R (fig. 44). Montrons qu'il se compose d'un cercle horizontal passant par le point A et par les centres optiques oculaires C_1 et C_2, et d'une verticale passant par le point V de ce cercle à égale distance de C_1 et de C_2.

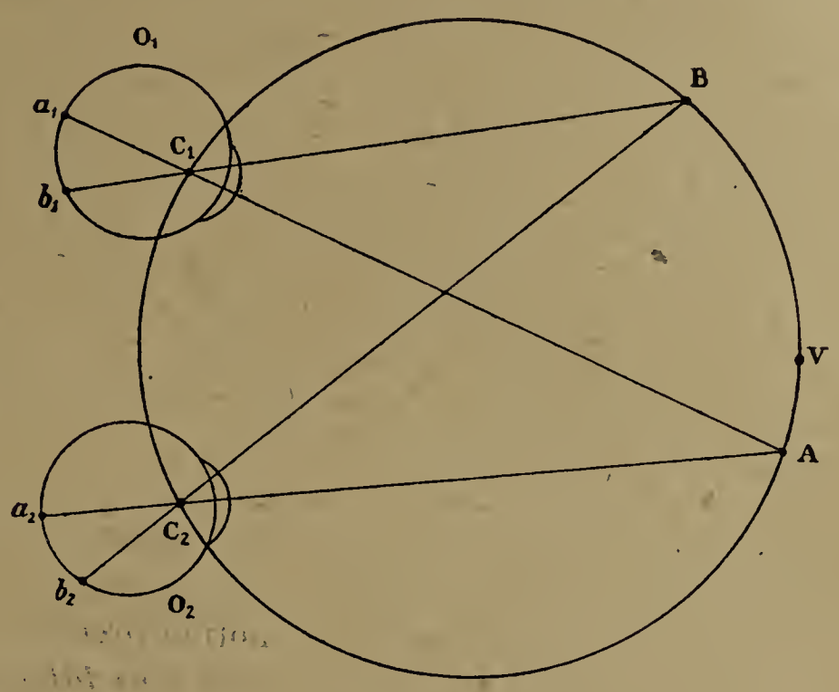


Fig. 44.

a_1 et a_2 sont les *foveas;* le plan du tableau est horizontal.

On a pour un point B quelconque du cercle susdit :

$$\overline{a_1 b_1} = \overline{a_2 b_2};$$

donc les points b_1 et b_2 des deux rétines se correspondent.

Les plans verticaux passant par V et par les centres optiques ont pour traces sur les rétines des droites qui se correspondent. Les points de la verticale V étant également distants de C_1 et de C_2, leurs images sont des points correspondants des verticales rétiniennes précédemment définies.

On vérifiera que les images des points extérieurs à cette circonférence et à cette droite ne tombent pas sur des points correspondants des rétines.

Lorsque les lignes visuelles sont horizontales et parallèles (quand on fixe un point situé à l'infini sur l'horizon), tous les points à distance fixée sont vus doubles. En effet le cercle et la droite horoptère qui comprennent tous les points vus simples, passent à l'infini. On peut encore dire que les points correspondants de la rétine sont conjugués de directions extérieures parallèles qui ne peuvent se couper qu'à l'infini.

54. Rôle de la vision indirecte.

1° — Nous reviendrons plus loin sur le problème général des *horoptères*. Lorsqu'on fixe un point F, nous montrerons que les seuls points

vus simples forment une courbe (courbe gauche du troisième degré) qui passe par le point F et par les centres optiques oculaires.

Les points vus simples sont donc l'exception.

L'expérience confirme la théorie.

Alors se pose la question fondamentale : comment n'avons-nous pas *ordinairement* conscience de voir double presque tous les points du champ visuel?

La raison (que nous retrouverons sous bien des formes) est que nous ne faisons attention à la fois qu'à un objet (celui que nous fixons), et que la sensibilité de la rétine diminue brusquement à une petite distance de la *fovea*. Comme le dédoublement croît à mesure qu'augmente la distance angulaire de la ligne visuelle et de la droite qui va au point lumineux dédoublé, la diplopie ne devient impossible à négliger en raison de sa grandeur que lorsque l'intensité lumineuse, devenue très faible, permet de la négliger en raison de la faiblesse des images.

La vision indirecte tire donc son importance capitale, non pas de ce qu'elle nous donne d'un coup la notion précise d'un objet étendu, mais de ce qu'elle nous permet d'amener *sans tâtonnement* le regard en ses divers points. Elle conserve présente la forme générale de l'objet et coordonne les observations de détail successivement effectuées. Le plus ou moins de précision de la vue d'ensemble n'a plus qu'une importance secondaire, la mémoire se chargeant en définitive de la synthèse.

2° — On a d'intéressantes observations sur la vision indirecte des enfants.

Dans une chambre obscure, à 1 ou 2 mètres de distance, on présente à un enfant de quelques semaines une bougie allumée : il la fixe avec attention. On écarte la bougie d'un mètre sur le côté, le haut ou le bas : il la perd de vue et porte vaguement les yeux ailleurs. Si par hasard il la retrouve, il la fixe à nouveau.

Ainsi, ou l'enfant ne sait pas se servir de la vision indirecte, ou il ne la possède pas encore. Dans les deux hypothèses, l'expérience montre l'utilité de cette vision pour faciliter les recherches préliminaires et la localisation générale.

55. Hypothèse plus exacte sur la correspondance des points des rétines.

1° — Énoncé de la loi de correspondance.

Voici d'abord l'énoncé de la loi plus exacte de correspondance; nous verrons ensuite comment on la démontre.

Supposons les rétines devant nous; celle de l'œil droit se trouve donc à notre gauche, et inversement. Les horizons rétiniens sont en OH, O'H'. Nous supposons le plan de regard choisi de manière qu'ils coïncident; les droites du plan de regard sont donc vues simples.

Cherchons alors dans quelle direction par rapport au plan du regard une droite doit se trouver pour qu'elle nous paraisse à angle droit avec

lui. L'expérience montre que la direction n'est pas la même pour les deux yeux. Appelons *méridiens verticaux apparents* les directions correspondantes des rétines ; ils sont placés comme l'indique la figure 45 ; *ils convergent vers le bas.*

Nous allons voir que les méridiens verticaux apparents se correspondent ; admettons-le pour l'instant.

Prenons pour axes de coordonnées les droites obliques HOV, H'O'V',

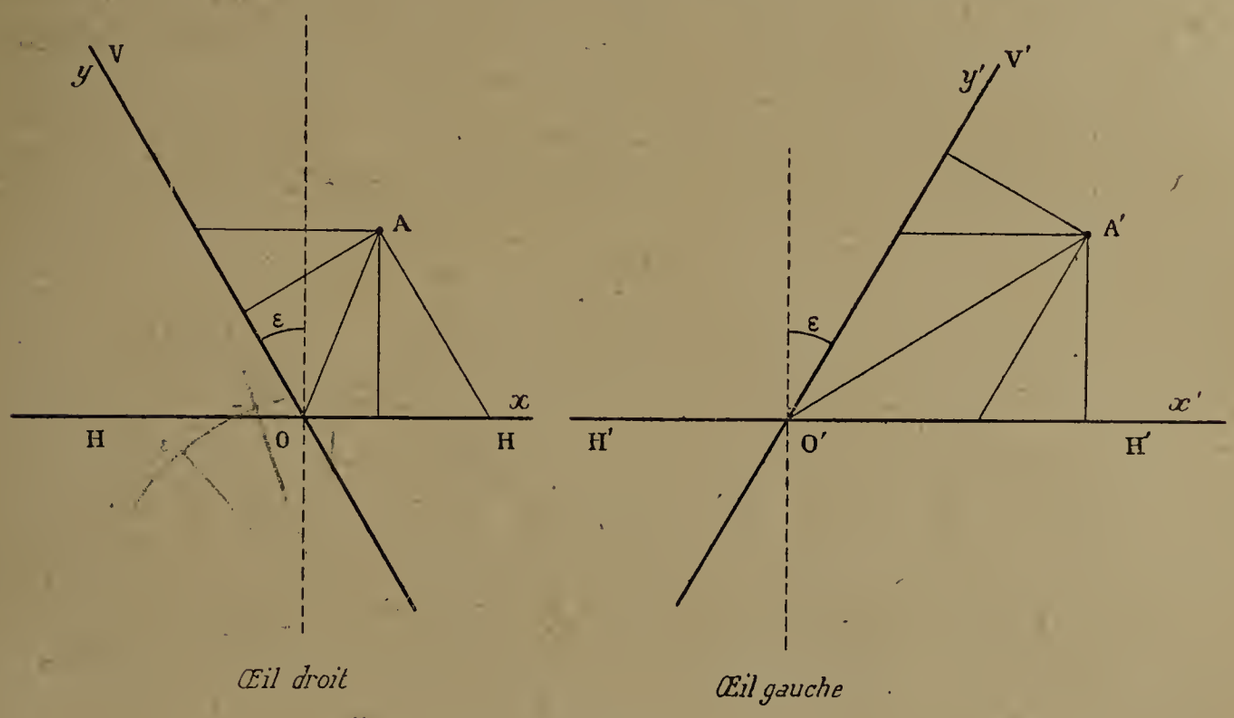


Fig. 45.

dont les angles sont $90^\circ + \varepsilon$ et $90^\circ - \varepsilon$ (l'angle ε est petit et de l'ordre de 2°).

Les points correspondants A *et* A' *ont même coordonnées obliques*

$$x = x', \qquad y = y'.$$

Il revient au même de dire que leurs distances $y \cos \varepsilon$, $y' \cos \varepsilon$, aux droites OH, O'H', et leurs distances

$$x \cos \varepsilon, \quad x' \cos \varepsilon,$$

aux droites OV, O'V', sont respectivement égales.

D'où cette conséquence singulière : les distances $\overline{OA}$, $\overline{O'A'}$, des points correspondants A, A', aux foveas O, O', ne sont égales que sur les axes de coordonnées.

On a :

$$\overline{OA} = \sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \sin \varepsilon}, \qquad \overline{O'A'} = \sqrt{x^2 + y^2 - 2xy \sin \varepsilon}.$$

La différence est maxima pour $x = y$. On trouve :

$$\overline{OA} = 2x \cos(45^\circ - \varepsilon : 2), \qquad \overline{O'A'} = 2x \cos(45^\circ + \varepsilon : 2).$$

La différence relative est de l'ordre de 2 0/0 avec les angles trouvés ci-dessus ; elle est mesurable et l'expérience confirme la théorie.

2° — Méridiens verticaux apparents.

a) Pour vérifier l'énoncé précédent, on place contre un mur deux disques de carton blanc (fig. 46), mobiles autour de leurs centres et sur lesquels on trace en noir un diamètre. Les centres sont à la hauteur des yeux; leur distance est celle des centres des pupilles (7 centimètres environ). On fixe le centre du disque droit avec l'œil droit, le centre du disque gauche avec l'œil gauche. Le diamètre noir de l'un des disques étant orienté n'importe comment, on s'efforce de placer l'autre de manière qu'il soit vu parallèle au premier ou fusionné avec le premier (ce que nous verrons possible, § 61).

b) Si le diamètre du disque droit est vertical (direction O1), pour la fusion le diamètre du disque gauche doit être incliné suivant O'1' (j'exa-

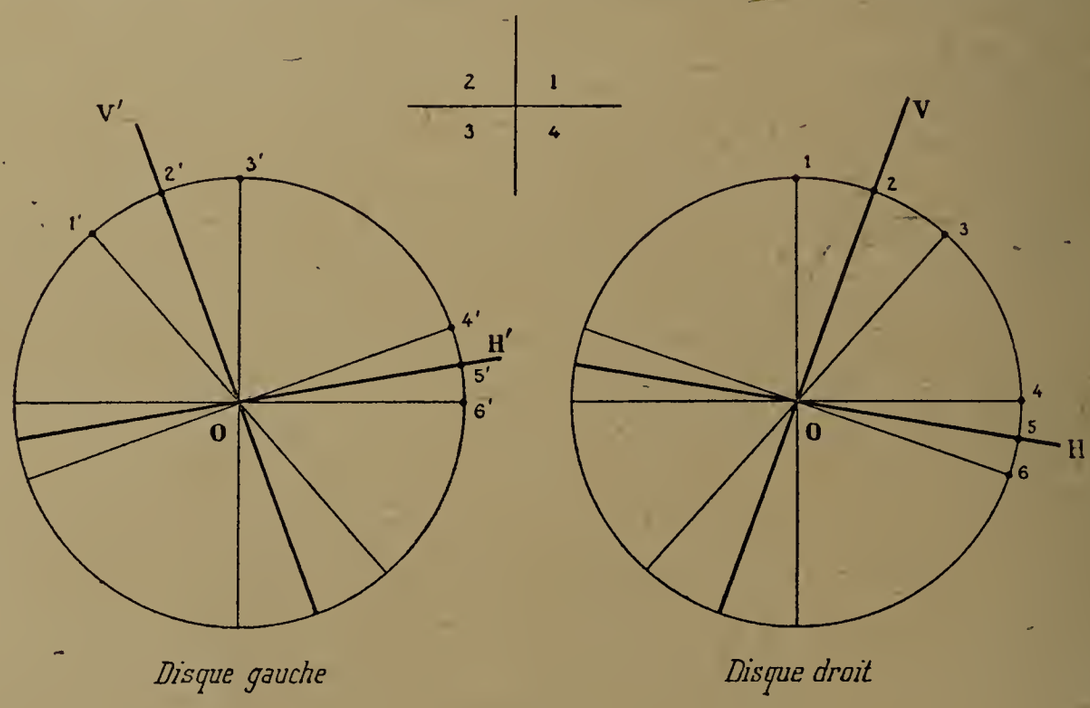


Fig. 46.

gère de beaucoup la grandeur des angles). Si alors on trouve le disque droit suivant 1, 2, 3, pour la fusion le diamètre du disque gauche doit tourner suivant 1', 2', 3'. Lorsque les diamètres font le même angle avec la verticale, les images fusionnées paraissent effectivement verticales : on définit ainsi les *diamètres verticaux apparents*.

L'angle 11', 22', 33', des droites correspondantes au voisinage de la verticale est environ de 2° et demi pour les yeux normaux; il est plus petit pour les myopes.

c) Regardons le système de deux lignes rectangulaires, une horizontale et une verticale. L'expérience montre que les angles 1 et 3 paraissent *obtus* pour l'œil *droit* (§ 26). Effectivement l'horizontale reste très approximativement horizontale (voir plus loin); la verticale tombe sur le diamètre effectivement vertical de la rétine. Puisque c'est la ligne OV qui paraît verticale à l'œil droit, la ligne O1 lui paraît tournée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à la verticale. L'angle 1 doit bien sembler plus grand qu'un droit.

On explique de même que les angles 1 et 3 soient *aigus* pour l'œil *gauche*.

d) On tend un fil à plomb à quelque distance d'un mur uniformément peint; on se met un peu loin du fil. Nous venons de voir que le fil est vu double et que les images dans les yeux ont les directions représentées par la figure 47, D pour l'œil droit, G pour l'œil gauche.

On fixe un bout de papier suspendu *en avant* du fil; on voit alors du fil des images doubles *homonymes* (§ 46), disposées comme l'indique la figure : *elles convergent vers le haut.*

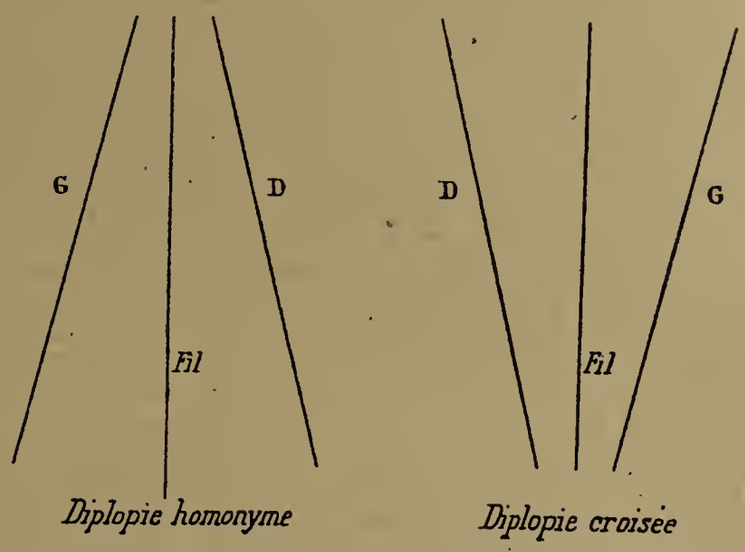


Fig. 47.

Si le bout de papier, est situé *derrière* le fil, les images doubles conservent leurs directions; mais comme il y a maintenant *diplopie croisée*, par suite déplacement latéral à partir des précédentes positions, elles convergent vers le bas.

3° — Horizons rétiniens.

Le plan du regard qui amènent en coïncidence les horizons rétiniens (position primaire) n'est ordinairement pas horizontal. Si donc le plan du regard est horizontal, les droites de ce plan sont généralement vues doubles : ce que l'expérience vérifie.

Pour étudier ce qu'il en est, on recommence les mêmes expériences en plaçant le diamètre noir au voisinage de l'horizon.

La correspondance est indiquée par les chiffres 4, 5, 6,... 4′, 5′, 6′. L'angle 44′, 55′, 66′, n'est plus que de l'ordre d'un demi-degré.

Pour que, vue avec l'œil gauche, une droite H′ paraisse horizontale, il faut donc qu'elle fasse environ un quart de degré avec l'horizon, son extrémité gauche étant au-dessous de l'horizon.

Même résultat pour l'œil droit : c'est alors l'extrémité droite de H qui est au-dessous de l'horizon.

56. Origine de la correspondance.

Il semble que la loi de correspondance soit due au rôle prépondérant que joue la vision du sol et des plans horizontaux situés au-dessous des yeux. Elle serait acquise au mieux de l'usage, comme le veut la théorie empiriste, mais acquise par l'expérience collective et transmise par hérédité, en quoi la théorie nativiste a raison.

Le plan du regard R qui définit les horizons rétiniens, plan dont les lignes sont vues simples, est donc incliné sur l'horizon.

Il nous est alors commode que la droite du sol S, située à petite distance dans le plan médian Π, soit vue simple ; il faut pour cela que les diamètres rétiniens s et s' sur lesquels se forment ses images, se correspondent. Or ils sont précisément l'un par rapport à l'autre comme les méridiens verticaux apparents étudiés au paragraphe précédent : *ils convergent vers le bas.*

Appliquons maintenant la loi de Listing (§ 29) à partir du plan de regard incliné R et des lignes visuelles convergentes OΩ et O'Ω, jusqu'au plan du regard horizontal et aux lignes visuelles parallèles : nous nous trouvons dans les conditions des expériences précédentes, et simultanément la disposition des diamètres correspondants est bien celle qu'elles fournissent.

57. Courbes correspondantes sur les rétines. Courbes vues simples.

1° — Traçons sur l'une des rétines (rétine 1) une courbe quelconque L_1 ; prenons sur la rétine 2 les points correspondants. Nous obtenons ainsi une ligne L_2 qui est identique à la première dans l'hypothèse du § 52, qui est de même degré dans celle du § 53.

Par tous les points de L_1 et par le point nodal postérieur de l'œil 1, menons des droites : nous définissons ainsi un cône γ_1. Par le point nodal antérieur du même œil, menons le cône Γ_1 dont les génératrices sont parallèles aux génératrices de γ_1. Opérons de même pour l'autre œil. Les cônes Γ_1 et Γ_2 se coupent suivant une courbe L *qui est vue simple, bien que ses points considérés isolément soient généralement vus doubles.*

En effet les images A_1 et A_2 du point A de cette courbe tombent en deux points a_1 et b_2 des rétines qui ne se correspondent généralement pas ; mais, d'après la construction même qui a fourni la courbe L, nous sommes assurés que les points correspondants a_2 et b_1 coïncident avec les images respectivement sur les rétines 2 et 1 de deux autres points de la courbe L.

2° — En particulier, si l'une des courbes L_1 est une droite, il en est de même de L_2 et de L. D'où le théorème : *par tout point* A *de l'espace, on peut mener une ligne droite qui est vue simple.* En effet les images du point A tombent sur les points a_1 et b_2 des rétines dont les correspondants sont b_1 et a_1. Les droites L_1 et L_2 menées respectivement par a_1 et a_2, b_1 et b_2, se correspondent sur les rétines, puisqu'elles passent par deux points correspondants et que les courbes correspondantes sont de même degré. Les cônes Γ_1 et Γ_2 sont des plans ; leur intersection est la droite L cherchée.

3° — Les intersections a_1 des courbes L_1 et λ_1, a_2 des courbes correspondantes L_2 et λ_2 sont des points correspondants. En effet par définition le conjugué a_2 du point a_1 qui est sur les courbes L_1 et λ_1, doit être sur les courbes L_2 et λ_2 : donc a_2 est un point d'intersection de ces dernières courbes.

On peut énoncer le théorème de la manière suivante : les points d'intersection de deux lignes L et λ qui sont vues simples, sont vus simples; ce qui est évident.

La forme générale des horoptères se déduit immédiatement du théorème précédent.

58. Forme générale de l'horoptère de points.

1° — Horoptères de droites.

Fixons un point F de l'espace; les lignes visuelles se coupent en ce point.

Traçons sur l'une des rétines une série de droites parallèles L_1; elles

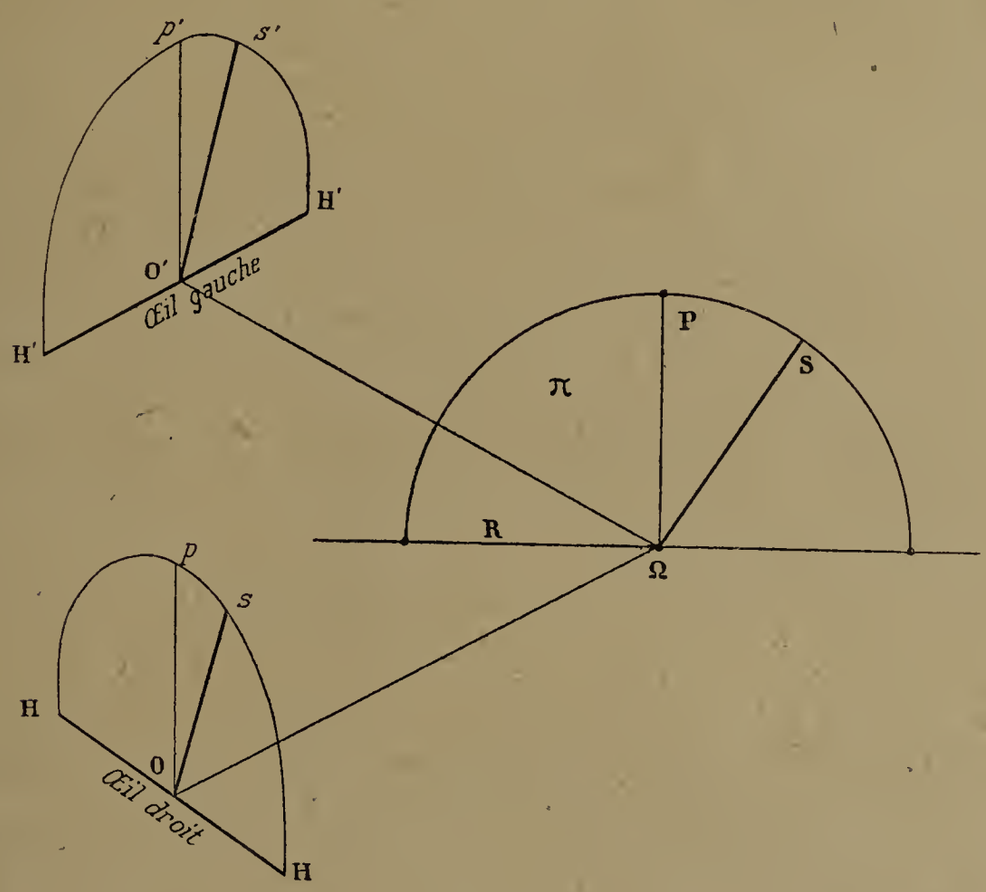


Fig. 48.

ont pour correspondantes sur l'autre rétine une série de droites parallèles L_2. En particulier les lignes L_1 et L_2 peuvent être parallèles aux droites OH, O'H', ou OV, O'V' (fig. 48). Dans ce cas elles sont correspondantes lorsque leurs distances à ces droites sont respectivement les mêmes.

Reprenons le cas général. Les faisceaux de droites correspondantes L_1 et L_2 déterminent extérieurement ces faisceaux de droites L qui sont vues simples (§ 57, *2°*).

On appelle *horoptère des droites* L la surface réglée qu'elles engendrent; on démontre que c'est un hyperboloïde à une nappe.

On trouvera la démonstration tout au long dans l'*Optique Physiologique* de Helmholtz.

2° — Horoptères de points.

On appelle *horoptère de points relatif au point de fixation* F (§ 52) le lieu des points qui sont vus simples quand on fixe le point F; c'est le lieu des points dont les images tombent sur des points correspondants des rétines.

Il résulte de ce que nous venons de dire que *l'horoptère est la courbe d'intersection de deux hyperboloïdes à une nappe.*

En effet traçons sur les rétines deux faisceaux de droites parallèles correspondantes de directions quelconques. A chacun de ces faisceaux correspond extérieurement un faisceau de droites L qui engendrent un hyperboloïde H. Soit H et H′ les deux hyperboloïdes ainsi déterminés. Tout point de leur intersection est à la fois sur deux droites vues simples; en vertu du 3° du § 57, il est vu simple. Donc l'intersection des hyperboloïdes H et H′ est l'horoptère qui correspond au point de fixation F. C'est généralement une courbe du quatrième degré, c'est-à-dire coupée en quatre points par un plan quelconque. En fait, les hyperboloïdes ont une génératrice commune : la courbe d'intersection est réduite au troisième degré.

Nous savons déjà que dans un cas particulier, elle se décompose en une circonférence et une droite (§ 53). Elle se décompose en une ellipse et une droite quand le point de fixation est dans le plan médian. Enfin dans le cas général la droite et la conique se raccordent en une courbe qui admet une asymptote et ressemble à l'horoptère étudiée au § 506 des Exercices de Mathématiques.

On vérifiera que dans les deux premiers cas, l'horoptère des horizontales se compose de deux plans, le plan médian et un plan normal au plan médian.

Appréciation du relief.

59. Appréciation de la distance et du relief comme résultat de la reconnaissance des objets.

Quand nous regardons un paysage, il est habituel de trouver dans le champ de vision un objet dont nous connaissons approximativement la forme et les dimensions *absolues*. Les dimensions *apparentes* permettent d'apprécier sa distance, par suite celle des points voisins. Il sert d'échelle de grandeur, par suite de repère de distance. Les *stadias* (voir mon cours sur la *Construction*, ... *des instruments*) appliquent ce principe avec le plus de précision possible.

Bien des causes faussent l'estimation. Dans la montagne par le brouillard, le moindre rocher étant supposé plus loin qu'il n'est, semble un pic énorme.

Le souvenir des objets intervient dans l'interprétation des images; il fausse ou rectifie le résultat brut de la sensation. Ainsi nous déchiffrons aisément les dessins de machines ou d'appareils, parce que nous con-

naissons les pièces qui les composent. Les photographies de rochers ou de glaciers ne représentent généralement qu'un chaos parce que leurs formes sont *a priori* inconnues. C'est pour la même raison que nous entendons difficilement les noms propres : nous devons les faire épeler.

Ces résultats, du plus haut intérêt psychologique, prouvent la part énorme de l'éducation dans l'interprétation de nos sensations actuelles. Le décroissement avec la distance de la grandeur apparente, les effets de l'éclairage, la perspective aérienne, la perspective chromatique, la connaissance d'une partie des objets, toutes ces données des expériences antérieures facilitent la mise en place dans le champ visuel.

60. **Appréciation monoculaire du relief.**

1° — Pour comprendre ce qui suit, le lecteur distinguera soigneusement *la conscience de la sensation actuelle* et *la conscience de sa variation* (§ 28).

La comparaison suivante montre de quoi il s'agit. Fermez les yeux et tâchez de mettre l'index à 1 centimètre du pouce, par exemple. *sans que préalablement les doigts se soient touchés* : vous n'y parviendrez que très grossièrement. Au contraire partez du contact : avec un peu d'exercice vous obtiendrez une précision bien meilleure. Nous avons donc une notion assez nette du *mouvement relatif* des doigts; nous n'avons qu'une notion rudimentaire de leur *position relative actuelle indépendamment des positions antérieures*; nous n'avons qu'une conscience vague du degré de contraction actuel des muscles.

Seconde distinction fondamentale : *la notion qualitative du relief, sa mesure quantitative.*

2° — Appréciation de relief par l'accommodation.

L'accommodation varie avec la distance de l'objet. Mais si les variations brusques d'accommodation sont sensibles à la plupart des yeux (encore le sont-elles peu), la grandeur actuelle de l'accommodation ne fournit aucun renseignement net. On s'en convainc en plaçant un objet de grandeur inconnue derrière un écran percé d'un trou unique; ou encore en regardant avec une loupe deux traits parallèles tracés sur du papier blanc. Nous sommes incapables d'indiquer même vaguement à quelle distance se trouve l'image virtuelle fournie par la loupe.

3° — Utilisation de la parallaxe.

Pour juger des distances relatives on peut utiliser la variation des apparences quand on déplace l'œil. C'est ce que fait le borgne ou le strabique.

Chacun connaît la façon dont les divers plans du paysage courent les uns par rapport aux autres, quand on regarde de la fenêtre d'un train en marche : ici les déplacements relatifs sont exagérés par le mouvement rapide de l'œil. Les physiciens utilisent le même artifice pour mettre l'image d'un objet dans le plan d'un réticule d'une lunette : ils

déplacent l'œil, et observent les mouvements relatifs de l'image et des fils (voir sur la mise au point mon cours : *Construction*, etc.).

Une bonne part de l'Astronomie repose sur la détermination des parallaxes. C'est aussi la raison pour laquelle un tableau ne produit jamais la sensation du réel. Pour rendre la représentation moins mauvaise, on conseille de regarder avec un seul œil immobile ; ce qui est une manière de dire que l'intérêt d'un tableau n'est pas dans la représentation exacte des objets.

60 *bis*. **Appréciation binoculaire du relief. Théorie des projections.**

1° — Le moyen usuel d'apprécier les distances et le relief consiste à utiliser les deux yeux.

Nous rencontrons ici une théorie célèbre, la *Théorie des projections*. Elle a passé longtemps pour exacte, mais elle est fausse précisément parce qu'elle oublie les principes posés au paragraphe précédent.

Voici ce que soutient la *Théorie des projections*. Les deux rétines fonctionnent à la manière des plans de la Géométrie descriptive : nous reportons le point vu à l'intersection des *lignes visuelles* (§ 14). *Sans qu'il soit nécessaire de mouvoir les yeux*, nous avons la notion et *la mesure* du relief d'après la conscience de la position relative actuelle des yeux, de la *convergence* actuelle des lignes visuelles. Le jugement sur la distance est dû à la comparaison *immédiate* des images obtenues *simultanément* par les deux yeux, comparaison rendue plus précise par le fait que les images sont simultanées.

2° — Éclairage instantané.

Le grand argument des partisans de cette théorie est le résultat de l'expérience suivante :

On regarde un point lumineux A situé dans une caisse noircie.

On fait éclater une étincelle en avant ou en arrière du point A. L'observateur reconnaît si l'étincelle est plus près ou plus loin de ses yeux que le point A, *bien que la durée de l'étincelle, très inférieure au millième de seconde, ne permette pas le déplacement relatif des yeux.*

Quand l'étincelle est entre l'œil et le point A fixé, elle donne des images doubles croisées; ces images sont homonymes quand l'étincelle est au delà de A (§ 46).

L'expérience montre donc que nous pouvons distinguer les deux cas et avoir une *notion* du relief d'après les sensations instantanées. Mais elle montre également que nous n'avons pas ainsi la *mesure* de ce relief : dans l'espèce *nous sommes incapables d'estimer la distance de l'étincelle au point A.*

Javal indique une expérience beaucoup plus simple amenant à la même conclusion : pendant que nous regardons un objet, si une mouche vient à passer, il nous est facile de la regarder aussitôt. Nous avons donc pu distinguer si elle était entre nous et l'objet. Ce jugement rapide

est évidemment dû au seul renseignement que nous possédions : *l'existence d'images doubles croisées ou homonymes.*

3° — Expériences de Wundt.

Wundt a institué des expériences où l'appréciation de la distance doit se faire, sinon sans mouvement des yeux, du moins avec le nombre minimum possible de repères.

Il regarde la partie moyenne d'un fil vertical noir AB, qui se détache sur un fond blanc éloigné et aussi uniforme que possible. Les yeux sont

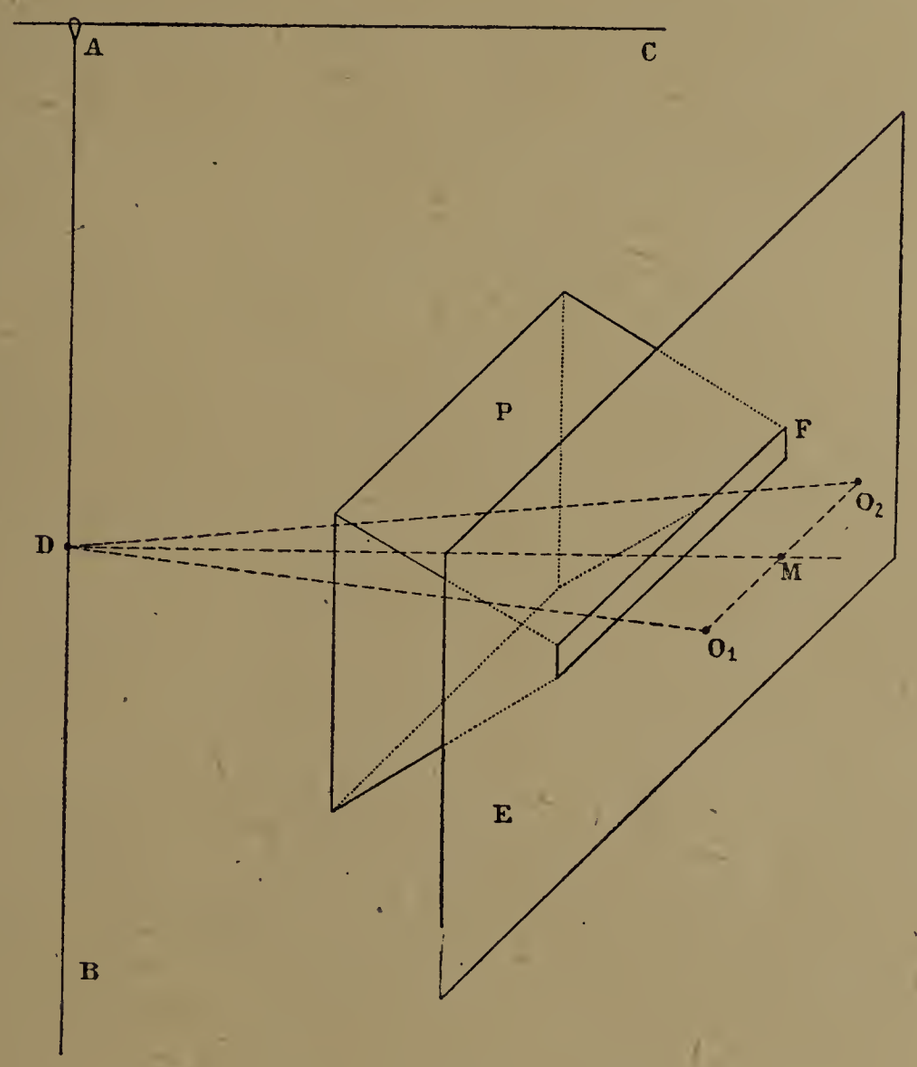


Fig. 49.

en O_1 et O_2; un système d'écrans noircis ne leur permet de voir que la partie moyenne du fil et le fond blanc : ils n'ont donc aucun repère. Le fil AB est mobile sur un fil horizontal AC; un aide le déplace sans prévenir l'observateur qui doit apprécier sa distance.

L'expérience montre qu'il se trompe grossièrement; l'erreur est de l'ordre de 50 p. 100, en plus ou en moins suivant l'observateur. Par exemple, Wundt estimait les distances à peu près moitié de leur valeur.

Au contraire la perception des *changements* de distance se fait avec une exactitude relativement grande et telle qu'on peut la prévoir d'après la *variation* corrélative de la convergence des lignes visuelles (§ 63).

Le lecteur doit se garder d'une confusion. L'expérience précédente n'a de sens qu'en raison de la suppression des repères. Disposons une baguette de bois suivant MD : l'appréciation devient plus précise, parce que nous faisons courir le regard le long de cette baguette; c'est alors la variation de convergence qui intervient.

En définitive la conscience de la convergence actuelle ne fournit qu'une indication vague sur la distance, indication qui peut même devenir illusoire quand nous modifions les circonstances ordinaires de la vision.

4° — Expérience d'Helmholtz.

On ferme les yeux. On place un objet, un crayon par exemple, à une distance *connue* des yeux. On s'efforce de faire converger dessus les lignes visuelles, les yeux restant fermés. On ouvre alors les yeux et... on constate que l'on fixe un point qui est en avant ou en arrière du crayon (en arrière généralement) : le crayon paraît double. On ne réussit à fixer le crayon sans le voir que si on le touche du doigt : la représentation de sa position est alors plus précise.

61. Relation entre la convergence et l'accommodation. Expérience de Javal.

1° — Avant d'aller plus loin et pour citer une expérience intéressante de Javal, disons quelques mots de la relation entre l'accommodation et la convergence.

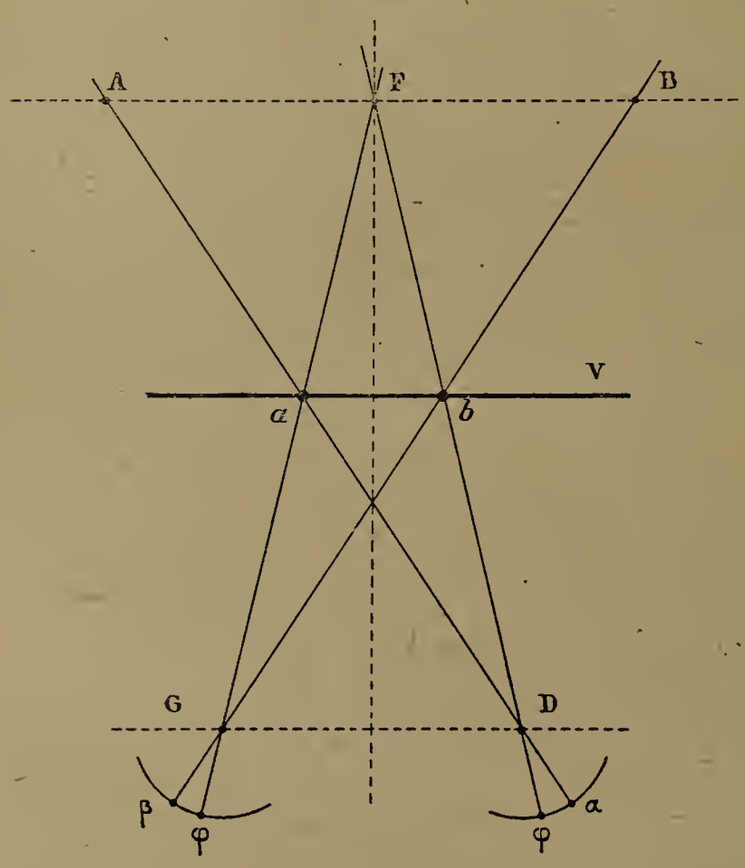


Fig. 50.

Qu'une certaine convergence soit ordinairement associée à une accomodation déterminée, est hors de doute. Mais un peu d'habitude permet de dissocier ces deux éléments de la vision nette. Ainsi l'on arrive facilement à fusionner et à voir nettement sans stéréoscope des images destinées à cet appareil (c'est-à-dire dont les centres sont sensiblement à la distance des pupilles, 7 centimètres en moyenne); ce qui exige un effort d'accommodation, sans convergence des lignes visuelles.

Voici une expérience facile à répéter (fig. 50).

Sur une plaque de verre V et à une distance inférieure à celle des

pupilles, on trace deux gros points noirs *a* et *b*. On regarde en projetant sur un fond uniformément éclairé (les nuages par exemple). On voit généralement quatre images. Il est facile de fusionner les images voisines, de manière à ramener à trois le nombre des images : deux des images tombent alors respectivement sur les foveas φ qui sont des points correspondants.

La convergence correspond au point de fixation F, l'accommodation correspond à la distance de la plaque V.

2° — Expérience de Javal.

Quand les images sont réduites à trois, le point central F paraît derrière le verre, à l'intersection des lignes visuelles; l'appréciation de sa distance résulte de la connaissance que nous avons de la distance du verre et de l'appréciation de la distance relative du point au verre.

A travers la vitre qui porte les points, regardons un nuage, c'est-à-dire un objet pratiquement à l'infini. Par un procédé quelconque, écartons les points *a* et *b*; le point de fixation F paraît s'éloigner : il semble *sur* les nuages quand la distance des points *a* et *b* est celle des pupilles. Jusqu'ici rien que de naturel.

Mais écartons les points davantage : *les lignes visuelles divergent.* Cependant nous continuons à fusionner les images en ce point F *qui nous paraît au delà du nuage.* Or comment se figurer qu'un point se trouve au delà d'un autre point qui pour nos yeux est à l'infini? Il faut conclure que les yeux ne renseignent que sur la distance relative de deux points, et non pas sur les distances absolues de ces points.

Les mouvements que les lignes visuelles sont obligées de faire pour converger successivement sur le point F et sur le nuage, nous apprennent que le point est au delà du nuage. Mais nous avons alors perdu conscience de la distance à laquelle le nuage est de nos yeux; le nuage est devenu pour nous un repère de position indéterminée.

62. Mouvement des yeux. Théorie de Brücke.

La mesure du relief est fournie par le mouvement des yeux.

1° — Que les yeux sont constamment mobiles et qu'il est même très difficile de les arrêter sans une éducation particulière sont des faits d'expérience vulgaire. Regarder un objet consiste à faire voyager le point de fixation à la surface de cet objet, ce qui exige de nombreux tâtonnements visuels. Nous essayons une série de convergences et d'accommodations dont nous percevons les variations. Ce voyage d'exploration binoculaire permet de reconnaître les points de l'objet qui sont les uns par rapport aux autres plus éloignés ou plus voisins de nous. Le peu de temps nécessaire à ce repérage, à cette localisation relative, ne doit pas donner le change sur la complexité des moyens employés.

Les mouvements des yeux se produisent d'une manière discontinue et par saccades; *la vision ne s'exerce que pendant le repos.* C'est ce que prouvent les images accidentelles *distinctes* du Soleil (§ 216) quand on

essaie de parcourir d'un mouvement continu l'horizon sur lequel le Soleil se couche. C'est ce que prouve également l'observation d'une personne qui lit ou joue du piano. Pour lire une ligne, l'œil effectue un certain nombre (5, 6,...) de saccades, de manière à la partager en 5, 6,... segments qui sont vus nettement les uns après les autres.

2° — Nous jugeons de la distance et du relief, non par la différence *actuelle* des images (les yeux restant immobiles), mais grâce à cette condition que pour fixer successivement les divers points de l'objet, nous devons recourir à des convergences et des accommodations différentes. Cette palpation est nécessairement liée à une différence dans les images; mais si la différence est circonstance nécessaire de l'appréciation du relief, elle n'en est pas la cause *immédiate*.

Ce système d'explication est renforcé par deux remarques : l'une psychologique, qu'on ne fait attention qu'à une seule chose à la fois; l'autre physiologique, que l'acuité visuelle diminue rapidement à quelque distance du point de fixation et que la vision indirecte manque de précision. En somme nous ne regardons simultanément qu'un petit fragment de l'objet; nous utilisons pour cela de la partie la plus sensible de la rétine.

3° — Le théorie de Brücke résout la difficulté qu'a soulevée l'invention du stéréoscope, mais qui évidemment existait avant elle : *le remplacement de la diplopie par la sensation du relief.*

Quand il y a sensation de relief, il y a sur les rétines des images différentes. Donc à supposer les yeux immobiles, il y a diplopie sauf pour le point fixé, les points immédiatement voisins et les points de l'horoptère. Cependant nous croyons voir simple.

L'inventeur du stéréoscope, Wheatstone, en avait conclu à l'inexistence des points correspondants, c'est-à-dire des points des deux rétines dont nous fusionnons toujours les sensations. En effet, disait-il, la vision binoculaire fusionne des images certainement différentes d'un solide, images certainement *disparates*. Soit a_1 et b_2 les points des rétines où tombent actuellement les images d'un point qui est vu simple. Soit a_1 et a_2 les points ordinairement considérés comme correspondants. Si a_1 et b_2 jouent *actuellement* le rôle de points correspondants, il est clair que a_1 et a_2 sont actuellement *disparates*; les points correspondants ne le sont donc pas α une manière absolue et inconditionnelle.

La théorie de Brücke n'admet au contraire ni le fusionnement, ni même la comparaison *immédiate* de l'ensemble des images d'un corps solide, images qui sont différentes pour les deux yeux. D'après elle nous voyons effectivement doubles les points dont les images ne tombent pas sur les points correspondants des rétines; mais cela ne nous gêne en aucune manière, parce qu'à chaque instant nous concentrons notre attention sur les images reçues par les points des rétines voisins des *foveas*; les images doubles des autres parties de l'objet passent inaperçues (§ 52). Le travail binoculaire d'où résulte la sensation du relief

stéréoscopique, consiste donc à palper simultanément les dessins différents respectivement placées devant les yeux, pour en associer au mieux les points, — ce qui implique une série de mouvements des yeux *avec variations de la convergence.*

Dans la vision binoculaire, l'attention se porte exclusivement sur le point de l'espace qu'on fixe; on néglige tout le reste. C'est en fixant successivement et rapidement les diverses parties des objets qu'on parvient à reconnaître leurs figures et leurs positions relatives.

63. **Jumelle stéréoscopique.**

1° — Pour exagérer la sensation du relief, il faut écarter les yeux. Comme c'est impossible réellement on utilise un double système optique à travers lequel tout se passe comme si les yeux avaient l'écartement désiré.

Nous décrirons plus loin le dispositif simple d'Helmholtz (télé-stéréoscope, § 82).

La *jumelle stéréoscopique* est une double lunette de Galilée schématiquement représentée dans la figure 51. Entre l'objectif et l'oculaire de chaque lunette sont deux prismes à réflexion totale dont le rôle est d'écarter les objectifs et de diminuer l'encombrement pour une distance focale donnée de ceux-ci. D'où un grossissement plus grand avec augmentation possible de la clarté (voir mon cours sur la *Construction....*).

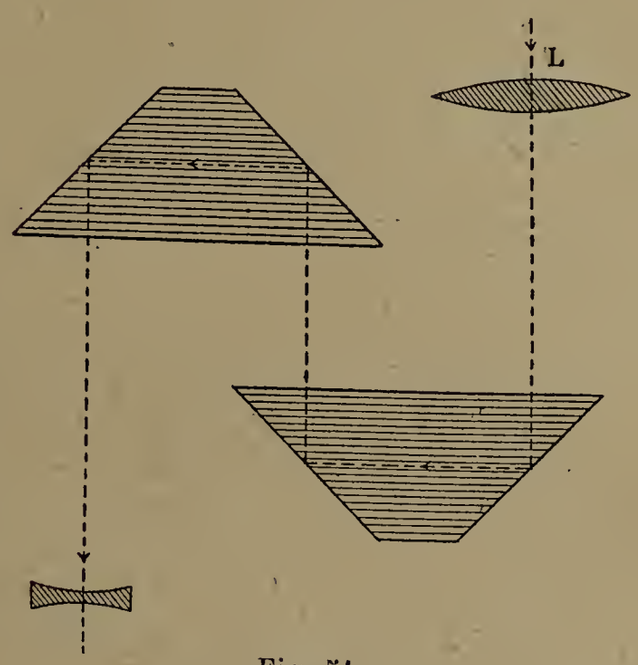


Fig. 51.

L'objectif L donne une image réelle qui après quatre réflexions se forme *renversée* comme si les prismes n'existaient pas, mais comme si l'objectif était déplacé latéralement. Cette image joue le rôle d'objet virtuel pour l'oculaire divergent à travers lequel elle donne une image virtuelle *droite* qu'on regarde.

2° — Augmentation du relief.

Il n'est pas inutile de chercher suivant quelle loi est augmenté le relief par l'usage de ces appareils.

Soit O_1, O_2, les yeux; soit $D = \overline{O_1 O_2}$, la *base* (distance des pupilles). Le point A est à la distance δ. On demande avec quelle approximation on peut évaluer la variation de distance $\overline{AB} = d\delta$.

Pour répondre à la question, voyons comment l'angle α qui mesure la rotation de chaque œil, est relié à $d\delta$. On trouve aisément :

$$\alpha = \frac{D}{2} \frac{d\delta}{\delta^2}.$$

Ainsi la précision dans l'évaluation de $d\delta$ varie en raison inverse du carré de la distance ; la mesure de $d\delta$ exige donc une base considérable quand la distance est grande.

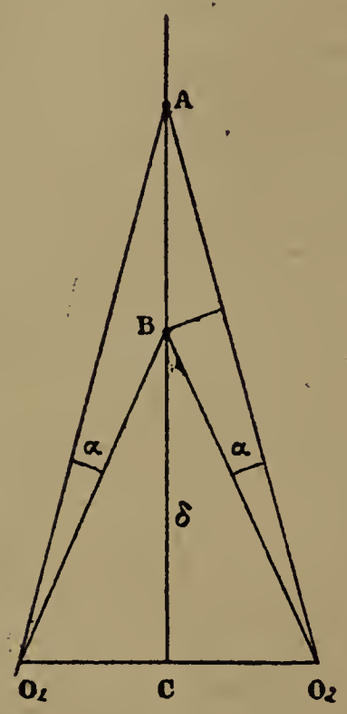


Fig. 52.

Ce calcul est nécessaire pour montrer le peu de profit qu'on tire des jumelles stéréoscopiques dès qu'on regarde à quelques centaines de mètres, même si le grossissement est notable.

La formule précédente suppose en effet la vision à l'œil nu.

Comme conséquence même de la définition du grossissement, elle devient pour une lunette grossissant G fois :

$$\alpha = \frac{GD}{2} \frac{d\delta}{\delta^2}.$$

Posons

$$\delta = 1\,000 \text{ mètres}, \quad D = 20 \text{ cm.};$$

d'où : $D : \delta = 2 \,.\, 10^{-4}$.

Cherchons à quelle condition la sensation du relief est appréciable sur un objet de 10 mètres d'épaisseur.

On a : $d\delta : \delta = 10^{-2}$; d'où : $\alpha = G\,10^{-6}$.

Or la seconde vaut $1 : 200\,000 = 5 \,.\, 10^{-6}$.

Pour le grossissement $G = 5$, il faudrait que l'œil pût évaluer la seconde d'arc.

Strabisme.

Je parlerai du strabisme parce que l'étude des strabiques est fondamentale pour établir la théorie de la vision binoculaire. Je me servirai du remarquable *Manuel du Strabisme* de Javal auquel je renvoie une fois pour toutes. Si je parle de l'étiologie et du traitement du strabisme, ce n'est que pour préciser nos idées, je n'ai aucune prétention oculistique ou médicale. Mais sous le prétexte que je ne suis pas médecin, m'abstenir de parler d'une affection qu'on peut très souvent guérir sans remèdes ni opérations, par de simples exercices *optiques*, me paraîtrait pousser jusqu'au stupide la séparation des genres. Au surplus Javal n'était médecin que de nom. C'était un excellent physicien.

64. Généralités sur le strabisme.

Le strabisme est une maladie dans laquelle les deux yeux ne fixent pas simultanément le même point.

Le strabisme est *divergent* quand le *mauvais œil* (généralement l'œil le plus astigmate) dévie en dehors; il est *convergent* quand le mauvais œil dévie en dedans.

Le strabisme est *unilatéral* lorsque c'est toujours le même œil qui louche; il est *alternant* lorsque le malade se sert alternativement d'un œil ou de l'autre (par exemple de l'un pour la vision éloignée, de l'autre pour celle des objets proches).

Le strabisme est *permanent* lorsque le malade ne se sert jamais que de l'un de ses yeux; il est *périodique* lorsque le malade ne louche que par intermittences.

Le strabisme *paralytique* est dû à une paralysie d'un ou de plusieurs muscles; le strabisme *concomitant* est généralement dû à un défaut d'innervation. Nous ne nous occuperons que de cette dernière forme.

Le strabique peut avoir conservé la vision binoculaire, au moins pour certaines positions de l'objet regardé; il peut au contraire l'avoir totalement perdu. L'œil ordinairement dévié peut avoir conservé ou perdu la faculté de fixation; cette faculté est une condition nécessaire au rétablissement de la vision binoculaire.

65. Mesure du strabisme.

1° — On appelle *déviation* l'angle formé par les lignes visuelles quand l'un des yeux regarde au loin. Le point d'intersection est en arrière de la tête si le strabisme est divergent. Dans le strabisme alternant, la déviation peut ne pas être la même quand le patient se sert d'un œil ou de l'autre. La déviation est naturellement très variable dans le strabisme périodique.

La connaissance angulaire précise de la déviation n'a pas d'intérêt.

Pour déterminer la déviation, le patient fixe avec le bon œil un point devant lui. On promène alors une bougie devant l'œil dévié jusqu'à ce que l'image cornéenne se trouve au milieu de la pupille : ce qui détermine avec une précision suffisante l'angle des lignes visuelles.

2° — Les lignes visuelles ne coïncident pas avec les axes de révolution des yeux; elles font avec ces axes un angle de quelques degrés (§ 14). Corrélativement les yeux sains d'une personne qui fixe un objet éloigné, paraissent un peu divergents. Chez certains individus cet angle qui est habituellement de 5°, grandit jusqu'à 10° et davantage : mais cela ne constitue pas un cas de strabisme.

3° — Il semble extrêmement simple de corriger le strabisme par l'emploi de prismes correcteurs. D'après la formule $\delta = A(n-1)$, qui relie la déviation δ à l'angle A supposé petit, on a pour la glace de St-Gobain ;

$$n = 1{,}53, \qquad \delta = 0{,}53 \,.\, A;$$

δ est sensiblement moitié de A. D'où la règle : pour corriger un strabisme de A degrés, il faut mettre *devant chaque œil* un prisme de A degrés. Cela est exact, à la condition que les yeux sachent voir bino-

culairement et fusionner les images; ce qui ne s'obtient généralement que par l'exercice.

66. **Strabisme des myopes.**

1° — Strabisme divergent.

Le myope dont les punctums proximums sont très voisins, doit beaucoup rapprocher les objets. Si l'un de ses yeux est moins myope ou plus astigmate, le myope trouve avantage à ne pas s'en servir; pour neutraliser facilement l'image correspondante, il écarte ses lignes visuelles : d'où un strabisme divergent (§ 50).

C'est le cas de ceux dont les yeux ne sont pas parfaitement égaux et qui se servent de besicles concaves pour travailler, ce qui leur permet de ne pas approcher l'objet regardé et corrélativement de ne pas converger.

Le strabisme divergent est facilité par cette circonstance que les yeux divergent naturellement quand on ne leur demande aucun effort, par exemple, pendant le sommeil naturel ou chloroformique. Quand un œil cesse de voir pour une raison quelconque (cataracte ou accident), il se met progressivement en divergence. Au surplus pour qu'il soit en *divergence relative*, il suffit qu'il ne converge pas dans la vision des objets proches; il s'habitue ainsi à rester en divergence relative pour toutes les distances de vision.

L'inégalité des yeux consiste dans une différence d'acuité visuelle ou de myopie. Mais le premier cas est de beaucoup le plus fréquent; ordinairement, même chez ceux qui louchent, la myopie est au début quasiment égale pour les deux yeux : c'est la différence d'acuité, le plus souvent causée par l'astigmatisme d'un des yeux, qui amène la divergence. Au surplus quand les yeux du strabique sont inégalement myopes, le surcroît de myopie de l'œil utilisé provient de ce qu'il est utilisé seul : ce n'est pas une cause, c'est un effet.

Même quand les yeux sont égaux, si la myopie est forte, la lecture binoculaire d'un texte implique des variations d'accommodation énormes, simultanées et inégales pour les deux yeux, en raison de l'inégale distance aux yeux des diverses parties de la ligne imprimée. On conçoit que le myope évite ce travail en divergeant et annulant une des images.

Pour guérir le strabisme divergent, une opération est généralement insuffisante. Il faut prescrire des verres corrigeant, outre la myopie, très exactement l'astigmatisme.

2° — Strabisme convergent.

Quand ses yeux sont bien égaux, le myope utilise les deux. Mais il doit converger beaucoup : il arrive alors que ses droits externes sont pour ainsi dire forcés : le redressement pour la vision éloignée est impossible. Le malade voit doubles les objets lointains : d'où un strabisme convergent alternant avec neutralisation d'une des images, strabisme qui augmente rapidement pour rendre la neutralisation plus

facile. Au début de sa maladie le myope strabique voit binoculairement les objets proches, monoculairement les éloignés.

On peut guérir le strabisme convergent des myopes en réapprenant au malade à voir simple et binoculairement les objets éloignés. On lui dit de fixer un point proche qu'on éloigne en l'exerçant à continuer de le voir simple. Corrélativement on lui prescrit des verres concaves avec défense d'approcher les objets qu'il regarde. Mais une guérison aussi simple est exceptionnelle parce que le strabisme est rarement pris à son début. En général une opération est nécessaire, l'état relatif des muscles étant devenu permanent et la déviation acquise.

67. Strabisme des hypermétropes.

C'est un fait que la plupart des strabiques *convergents* sont hypermétropes. Javal pose que le plus souvent le strabisme convergent est causé par une paralysie temporaire de l'accommodation. Le patient étant hypermétrope, doit accommoder toujours fortement; or la convergence et l'accommodation sont liées par l'habitude de manière que l'une et l'autre augmentent en même temps dans les conditions normales. Une paralysie partielle de l'accommodation implique, pour produire la vision nette des objets rapprochés, une innervation considérable qui, bien que produisant peu d'effet, s'associe avec une innervation également considérable des muscles amenant la convergence : d'où strabisme.

Le strabisme *périodique* se présente dans les circonstances suivantes. L'enfant tient ses yeux correctement pour toutes les directions du regard et même pour toutes les distances. Brusquement il se met à loucher quand on lui présente à lire une page de petits caractères typographiques. Généralement le malade est hypermétrope : il ne peut forcer son accommodation sans faire converger ses yeux : d'où strabisme. Plusieurs savent choisir entre la vision confuse et le strabisme : ils savent ne pas loucher à la condition de ne pas chercher à voir distinctement.

La correction d'un tel strabisme consiste simplement dans le port de verres convexes assez forts permettant sans fatigue l'accommodation nécessaire à la vision nette.

68. Strabisme convergent alternant.

Plaçons-nous en face du sujet. Sans cause apparente, il vous regarde avec l'un ou l'autre de ses yeux. Levons notre main droite : qui est par conséquent à gauche du patient; c'est son œil droit qui fixe; le gauche est dévié. C'est au contraire l'œil gauche du patient qui fixe; si l'objet à regarder est à sa droite, c'est-à-dire à notre gauche. Tout cela, en raison de la loi de moindre effort.

Plaçons deux observateurs à peu près dans les directions des lignes visuelles du patient. Pour les regarder alternativement, le strabique

alternant fait des mouvements insignifiants : *il se borne quasiment à un déplacement d'attention*, alors qu'une personne saine doit user de rotations oculaires étendues.

Dans cette expérience le patient voit les têtes des observateurs à leur vraie place, tandis qu'un sujet sain qui, par une violente contraction des droits internes, réussit à loucher fortement, fusionne les images de ces têtes. Autrement dit, le strabique dissocie les images qui tombent simultanément sur les *foveas*, tandis que le sujet sain les confond.

Les yeux de ces strabiques sont également bons; aussi louchent-ils fortement dans la nécessité d'écarter des images qui sont parfaites et dont ils ne peuvent neutraliser l'une qu'à la condition qu'elle diffère beaucoup de l'autre.

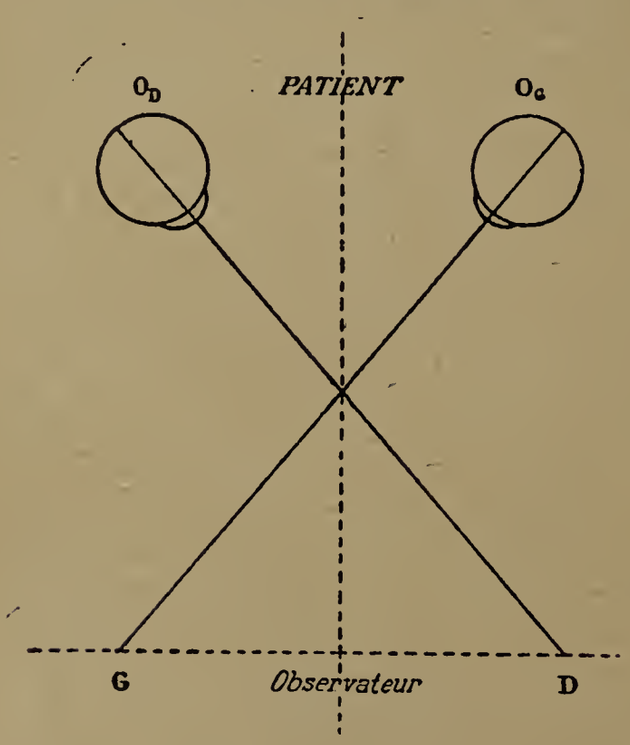


Fig. 53.

Jamais ils ne se servent simultanément de leurs yeux; ils savent neutraliser alternativement les indications de l'un et de l'autre, et transporter leur attention de l'un sur l'autre avec une extrême rapidité. Quand ils fixent l'objet G avec l'œil gauche, ils voient en vision indirecte l'objet D : ils savent localiser d'une manière correcte *par rapport à leur corps* aussi bien l'image directe que l'image indirecte. De même quand ils fixent l'objet D avec l'œil droit et voient indirectement l'objet G, ils localisent correctement ces deux objets.

Ils se sont donc accoutumés à localiser au même endroit par rapport à leur corps le même objet vu par l'un des yeux en vision directe, par l'autre *aussitôt après* en vision indirecte; ce qui revient à dire qu'ils apprécient correctement la parallaxe qui résulte de leur strabisme.

La vision simple de ces strabiques a donc un tout autre caractère que celle des yeux sains : elle provient d'une vision *qui est toujours monoculaire*, avec établissement d'une relation correcte entre les champs de vision des deux yeux utilisés alternativement.

69. **Fausse projection.**

1° — Nous arrivons à une question difficile; le lecteur se rappellera qu'il s'agit ici de vision *monoculaire* plus ou moins alternante; il ne passera pas à ce paragraphe sans bien posséder le précédent.

Supposons qu'une opération pratiquée sur l'œil droit du strabique ci-dessus étudié corrige une partie de son strabisme. Avec son œil gauche il fixe l'objet A, puis il porte son attention sur les sensations

de l'œil droit qu'on vient d'opérer. Pour projeter au même point extérieur l'image directe de l'œil gauche et indirecte de l'œil droit, il s'est accoutumé à trouver la cause de cette dernière dans une direction faisant l'angle α avec la ligne visuelle *habituelle* V de l'œil droit, direction qu'il sait repérer par rapport à son corps.

En raison de l'opération, l'angle de la direction du point A et de la nouvelle ligne visuelle V' est devenu β. Donc l'œil projette *faussement* l'image indirecte du point A en A', dans une direction faisant l'angle β avec la direction V qu'il sait repérer par rapport à son corps.

D'où diplopie avec images croisées.

L'erreur provient de la non-conscience du changement de direction de la ligne visuelle de l'œil droit.

C'est là une diplopie en vision monoculaire alternante qui n'a aucun rapport avec la diplopie ordinaire en vision binoculaire. Si avec une pince on prend la conjonctive et qu'on ramène l'œil droit à sa direction antérieure par rapport au gauche, la diplopie disparaît.

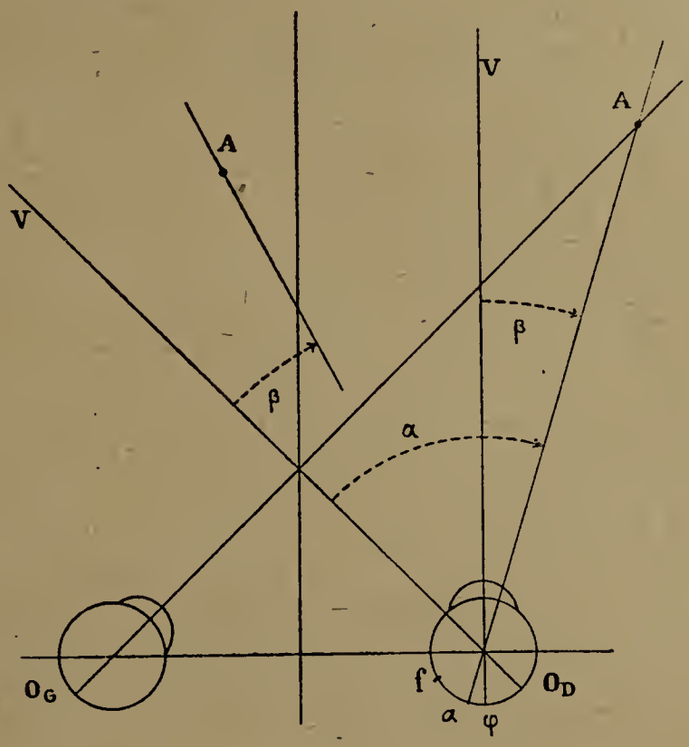


Fig. 54.

On dit qu'après l'opération il y a *fausse projection*; c'est une manière d'exprimer que le patient avait appris à se servir *successivement* de ses deux yeux en rapportant les champs de vision l'un à l'autre d'une manière correcte. On a modifié la relation de ces deux champs : d'où la diplopie.

2° — Le phénomène a été difficile à interpréter correctement parce qu'on supposait que les points de repère étaient les deux foveas, tandis qu'ils sont en réalité la fovea de l'œil qui fixe et ce qu'on appelle parfois la fovea vicariante de l'œil dévié (§ 52).

Tandis que l'image α de A dans l'œil droit est à l'intérieur de la fovea vraie φ, elle est à l'extérieur de la fovea vicariante *f*. D'où les images *croisées* (la projection A' de l'image dans l'œil droit est à gauche de la projection A de l'image dans l'œil gauche) alors qu'on s'attendait à trouver des images *homonymes* (§ 46).

Si l'on fait des exercices de vision binoculaire, on obtient que la vraie fovea joue un rôle : le malade voit alors binoculairement des images doubles homonymes. On conçoit que leur intermédiaire se présente : le malade projette simultanément en prenant comme repère les fovea *f* et φ; d'où une *triplopie binoculaire*.

3° — Le malade voit donc dans l'œil droit une image indirecte qu'il projette à gauche. Cependant si son strabisme est alternant et qu'on lui demande de fixer l'objet A avec l'œil droit, sans hésitation il tourne l'œil droit vers la droite ; rotation paradoxale de l'œil vers le côté inverse de celui où apparaît l'objet. Cela tient à ce que pour juger de la position de l'objet, il se sert comme plus sûre de l'indication donnée par l'œil gauche, indication qui localise l'objet à droite.

70. **Emploi de la louchette. Occlusion volontaire d'un œil.**

1° — On appelle *louchette* un hémisphère en treillis métallique doublé de papier noir qu'on porte devant un des yeux et qui supprime la vision par cet œil. Il s'agit de revenir à la vision binoculaire, pour cela d'empêcher d'abord la neutralisation habituelle d'une des images. Il faut ramener le patient à se servir correctement de son mauvais œil, lui réapprendre parfois à fixer ; il faut produire l'égalité entre les yeux, condition essentielle pour qu'on puisse, une fois la vision binoculaire rétablie, arriver à supprimer la diplopie.

Nous avons deux appareils de vision ; on conçoit la nécessité que chacun d'eux isolé se conduise correctement avant qu'il soit possible d'associer leurs indications. Le port de la louchette devant un œil s'associe avec la correction (au moyen d'un verre) de la réfraction de l'œil laissé libre.

Observation importante : quand on force le patient à utiliser l'œil dont il neutralisait habituellement les indications, on constate une augmentation rapide et considérable de son acuité visuelle. Avec de la patience on finit même, en corrigeant exactement la réfraction, par rendre l'acuité du mauvais œil égale à celle du bon. Il semble donc que, dans le but de faciliter la neutralisation, le patient s'était rendu quasi borgne, l'œil dévié avait quasi perdu la faculté de voir net, faculté qu'il réacquiert avec une rapidité souvent étonnante.

Le port de la louchette a pour but principal d'éviter la neutralisation ; aussi ne doit-on jamais cesser de la porter sur l'un des yeux, toujours le même ou alternativement l'un ou l'autre, l'alternance étant indiquée par la nature du strabisme. Il est impossible de supprimer le strabisme avant d'avoir restitué la vision binoculaire et la diplopie qui en résulte d'abord.

2° — Occlusion volontaire de l'œil.

En général on ne sait fermer qu'un œil, le moins bon. Il faut une éducation pour fermer l'un ou l'autre à volonté ; mais elle est rapide. La faculté de fermer alternativement l'un ou l'autre œil est une préparation à la transformation du strabisme unilatéral en strabisme alternant, et à l'apparition des images doubles binoculaires. On enseigne ainsi à faire entrer en fixation l'œil habituellement dévié.

L'occlusion volontaire d'un œil est, pour les adultes, un moyen de suppléer la louchette qu'il leur est très désagréable de porter.

71. Exercices avec le stéréoscope, avec les prismes.

1° — Le stéréoscope tel qu'il est ordinairement employé (§§ 77 et suivants), sert à obtenir la sensation du relief à partir de deux images planes *différentes*. Dans le traitement du strabisme, il sert au contraire à obtenir la fusion binoculaire de deux images identiques.

Insistons sur son rôle.

En raison du strabisme, les images dans les deux yeux d'un objet unique A sont placées d'une manière si différente par rapport aux foveas que le malade n'a aucun guide dans la recherche de leur fusion; il en est réduit à neutraliser l'une d'elles. On substitue donc à l'objet unique A deux objets *identiques* A_1 et A_2 placés de manière que leurs images respectives dans les deux yeux ne soient pas trop distantes. Le patient s'exerce à les fusionner. Si la distance des objets A_1 et A_2 est variable, on amène peu à peu le malade à fusionner leurs images lorsqu'ils se rapprochent, enfin lorsqu'ils coïncident : le strabisme est alors guéri.

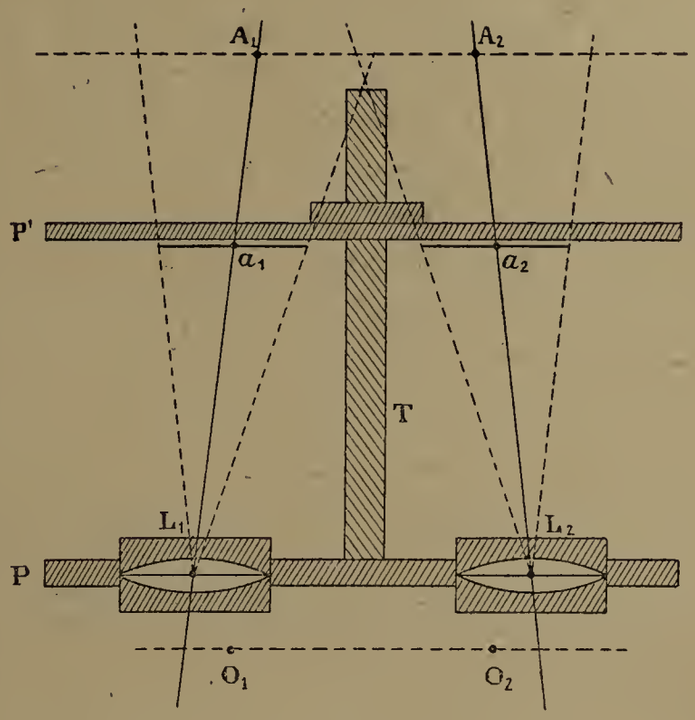


Fig. 55.

Pour obtenir le résultat précédent, on pourrait effectivement utiliser deux objets A_1 et A_2 identiques et placés à une certaine distance l'un de l'autre et du patient. Il est plus commode, en particulier moins encombrant d'employer un stéréoscope.

2° — Voici la forme usuelle des stéréoscopes médicaux.

Deux lentilles verticales de 10 dioptries L_1 et L_2 sont mobiles sur la tige P au moyen d'une vis à filets inverses (non représentée).

Les dessins a_1 et a_2 glissent le long de la planchette P'; enfin cette planchette elle-même coulisse sur la traverse T, ce qui permet de placer les dessins à une distance connue des lentilles.

Les lentilles donnent des dessins a_1 et a_2 deux images virtuelles A_1 et A_2 dont les distances aux yeux O_1 et O_2 sont aisément calculables, et qui leur servent d'objets réels.

En écartant plus ou moins les lentilles où les dessins, il est donc facile d'obtenir que les images soient à des distances connues l'une de l'autre et des yeux.

Par exemple si le strabique est convergent, en rapprochant les dessins ou en éloignant les lentilles, on amène les images A_1 et A_2 à être

simultanément vues par les deux yeux. L'exercice consiste à maintenir la fusion quand on rapproche les lentilles.

On augmente le champ de l'appareil en plaçant devant les lentilles deux prismes, de 10° par exemple, avec leurs arêtes verticales tournées en dehors ou en dedans. Ils produisent chacun un déplacement angulaire voisin d'environ 5°.

3° — Lorsqu'on procède aux exercices avec le stéréoscope, le grand écueil est la neutralisation de l'une des images. Pour qu'il soit possible de contrôler à chaque instant l'existence de la vision binoculaire, on emploie des dessins non pas identiques, mais complémentaires. Par exemple ce sont deux textes typographiques dans chacun desquels manquent des lettres qui se trouvent dans l'autre : il faut que la vision binoculaire rétablisse le texte en son entier.

4° — Stéréoscope a charnières de Javal.

Quand la déviation est très grande, on doit utiliser le stéréoscope *à miroirs et charnières* de Javal.

Il se compose de deux miroirs M_1 et M_2 et de deux planchettes P_1 et

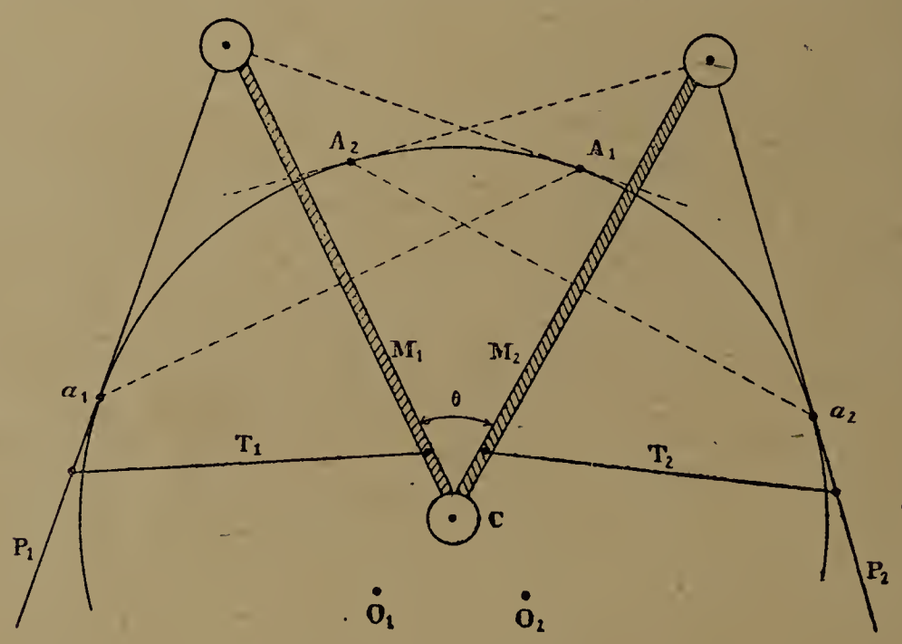


Fig. 56.

P_2 que des tirants T_1 et T_2 maintiennent à 45° des miroirs. Les miroirs sont articulés à charnière de manière qu'on puisse faire varier leur angle θ. Les dessins a_1 et a_2 sont plaqués contre les planchettes. Leurs images sont en A_1 et A_2. Quand on modifie l'angle θ, les images se déplacent sur un cercle de centre C.

Quand l'angle θ vaut 90°, les planchettes P sont parallèles et les points A coïncident : nous retombons sur le stéréoscope de Wheatstone (§ 80).

5° — Exercices avec les prismes.

On peut aider la vision binoculaire et la fusion des images avec des prismes qu'on prend d'abord d'angle assez grand, puis à mesure que

l'éducation s'acquiert, d'angle de plus en plus petit. Mais c'est un procédé qui n'est guère pratique et qui en tout cas est très inférieur à celui du stéréoscope.

72. Guérison du strabisme au moyen des opérations.

Voyons ce que peut donner une opération pour la guérison du strabisme. On distingue deux cas : on se borne à chercher un effet esthétique; on désire la guérison parfaite. En effet ce n'est pas le tout que les yeux aient leurs axes visuels convenablement placés l'un par rapport à l'autre; il faut encore que les images doubles soient fusionnées, au moins que l'une des images soit neutralisée. Si les images doubles sont trop voisines, la neutralisation est difficile; conséquemment le patient cherche à les éloigner : le strabisme récidive (§ 50). En général il est donc vain d'espérer la guérison comme résultat d'une opération, sans l'aide d'exercices ultérieurs amenant la vision binoculaire et la fusion des images.

Quoi qu'il en soit, si l'on ne cherche qu'un effet esthétique, on opère (c'est-à-dire on sectionne plus ou moins les muscles droits internes ou externes) en ayant soin de sous-corriger le strabisme convergent et de surcorriger le divergent. Voici pourquoi : en général l'œil qui ne participe pas à la vision, se met à diverger : ce qui finit par être très laid; il importe donc de laisser les yeux dans un état de convergence modérée.

Si au contraire on croit pouvoir aller jusqu'à la guérison, il faut amener les yeux en divergence modérée, les exercices de convergence étant plus faciles que ceux de divergence.

Au reste l'opération ne présente aucun danger. Il semble d'abord que l'extérieur de l'œil soit antiseptique : une propreté facile à réaliser met donc à l'abri de toute infection; il suffit d'anesthésier localement à la cocaïne ce qui permet de graduer l'opération d'après le résultat dont le patient peut rendre compte.

CHAPITRE V

PERSPECTIVES CONJUGUÉES

73. Reconstitution d'un objet à partir d'une perspective unique.

1° — Une seule perspective ne représente un objet *déterminé* que par convention. Strictement parlant elle représente une infinité d'objets, puisque les seuls éléments déterminés sont les directions, non les distances. Il semblerait donc impossible de figurer des objets solides sur un plan *sans tomber dans une indétermination absolue*; ce que contredit l'expérience vulgaire basée sur l'existence des tableaux et des dessins. A la vérité il faut une éducation pour comprendre telle ou telle représentation : montrez un dessin à un nègre, il n'y verra que des traits sans aucune signification; nous savons que l'aveugle auquel on rend la vue, se trouve dans le même cas (§ 37).

Heureusement dans la restitution solide des objets représentés par un tableau, nous sommes aidés par la connaissance antérieure de leur forme.

Je trouve dans un traité de perspective, au chapitre intitulé *Restitutions précises*, la définition suivante du problème : « De la perspective d'un objet déduire ses dimensions vraies ». Je regrette que l'auteur n'ajoute pas immédiatement qu'un tel problème n'a pas de solution.

Assurément si l'on sait que deux lignes sont horizontales et parallèles, leur intersection (point de fuite) fournira l'horizon du tableau. Si le tableau représente la mer, *à quelque hauteur que soit le spectateur au-dessus d'elle*, l'intersection de la mer et du ciel est la ligne d'horizon.

2° Dans certains cas la connaissance des angles que font réellement des droites du tableau, permet de retrouver le point de fuite principal et la distance principale.

Montrons par exemple qu'il en est ainsi quand on connaît deux angles droits dans des plans horizontaux.

Supposons que ces angles soient issus du même point S; les traces A, B, D, E, de leurs côtés sur le tableau sont sur l'horizontale H'. Construisons la figure en vraie grandeur; appuyons-nous sur l'hypothèse que les segments $\overline{AD}$ et $\overline{BE}$ sont capables d'un angle droit : nous trouvons ainsi le point S'. La figure S'ABDE placée horizontalement se projette donc sur la figure SABDE.

Le point de vue est dans le plan SCS′ qui coupe le tableau suivant SC; le point de fuite principal est en P, intersection de S et de la ligne d'horizon H.

La distance principale est évidemment donnée par l'équation :

$$\frac{\Delta}{\overline{CS'}} = \frac{\overline{SP}}{\overline{SC}}; \quad \text{d'où :} \quad \Delta = \overline{PO}.$$

La construction suppose qu'on connaît le plan horizontal dans lequel se trouve le point S, c'est-à-dire qu'on connaît la droite H′.

Mais on obtient le même résultat, quelle que soit la droite H′ d'où l'on part, en particulier quand on se sert de l'horizon lui-même H.

En effet un théorème classique donne :

$$\overline{CS'}^2 = \overline{AC} \cdot \overline{CD} = \overline{BC} \cdot \overline{CE},$$

d'où, en posant $\overline{BC} = x$,

$$(\overline{AB} + x)(\overline{BD} - x) = x(\overline{BE} - x).$$

Quand on remplace les segments $\overline{AB}$, $\overline{BD}$, $\overline{BE}$, par des segments

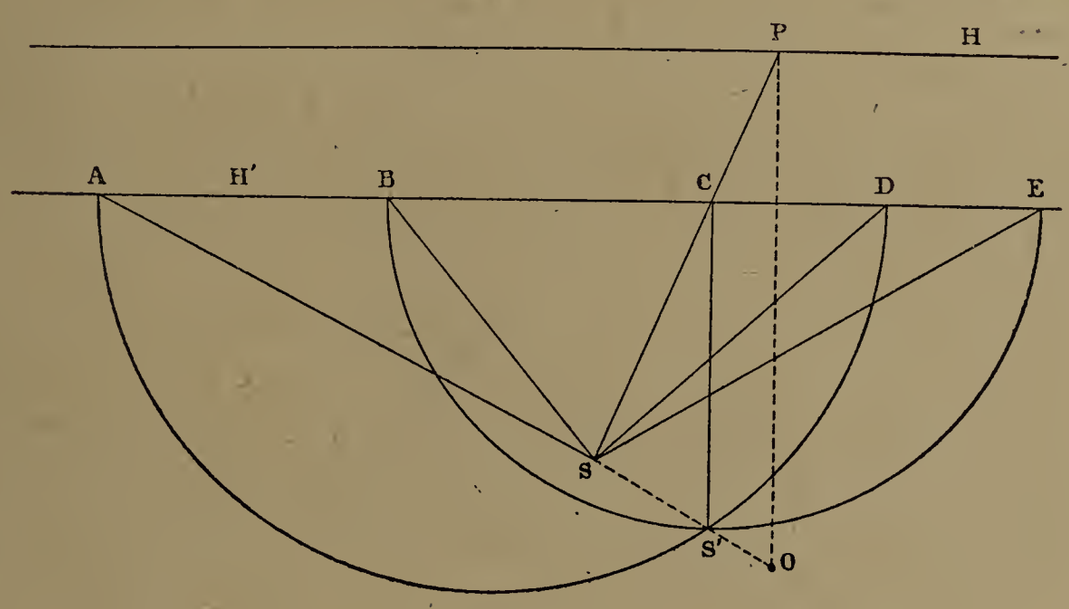


Fig. 57.

proportionnels, x varie proportionnellement : donc le point C est sur une droite SP. On démontrerait de même que le point S′ est sur une droite.

Nous supposons que les angles droits sont issus du même point, ils peuvent être issus de deux points quelconques, pourvu que leurs côtés soient horizontaux.

En effet soit Sab, $S_1a_1b_1$, les sommets et les points où les côtés rencontrent l'horizon. Les droites du tableau Sa_1 et Sb_1 sont respectivement les projections de deux droites parallèles à celles dont S_1a_1 et S_1b_1 sont les projections. Nous pouvons donc effectuer la construction à partir des quatre droites Sa, Sb; Sa_1, Sb_1.

Pour retrouver le point de fuite principal et la distance principale, il

suffit donc d'avoir dans le tableau deux angles droits dont les côtés soient respectivement dans un plan horizontal. Il suffit même, on le montre aisément, que ces angles aient des valeurs quelconques *connues*.

Mais nous ne sommes pas plus avancés pour cela : la restitution exacte reste aussi impossible quand nous connaissons les caractéristiques de la projection que quand nous ne les connaissons pas. Le problème est indéterminé, à moins que nous n'ajoutions des conditions supplémentaires.

3° — Plus loin dans le même traité de perspective sous le titre : « *Restitutions visuelles* », je trouve la définition suivante du problème : « Le spectateur se déplaçant devant le tableau, dire comment varie l'aspect des objets représentés ». Ce problème n'a pas plus de sens que le premier? Comment répondre à la question suivante : dire comment varie quelque chose dont nous ignorons la valeur tant au début qu'à la fin de l'opération?

Au surplus la suite du chapitre du traité que j'ai sous les yeux, met en évidence l'erreur fondamentale. « Tel angle qui paraissait droit regardé du point de vue vrai, ne le paraîtra plus quand on se déplacera. » Malheureusement il est faux de dire que sur une perspective et d'une manière absolue, un angle nous paraît droit ou différent d'un droit; un angle nous paraît droit parce que *nous voulons* qu'il en soit ainsi, mais non certes parce que la perspective fixe quoi que ce soit à cet égard.

Si l'objet nous est connu, si par exemple c'est une table qu'à la forme générale des pieds nous jugeons rectangulaire, nous verrons ses angles comme droits où que nous nous plaçions; — et c'est heureux parce que s'il n'en était pas ainsi, il n'y aurait plus qu'à brûler les musées.

Répétons le à satiété : *un tableau ne représente que ce que nous voulons y voir; c'est une convention pure et simple.* Un objet, vu d'un point de vue déterminé, a sur un tableau déterminé une perspective déterminée; tout le monde est d'accord.

Mais une perspective ne correspond à aucun objet déterminé.

74. **Reconstitution géométrique à partir de deux perspectives.**

Au point de vue strictement géométrique l'indétermination disparaît si nous donnons sur le même tableau les perspectives à partir de deux points de vue différents.

Pour ne pas compliquer inutilement, prenons le tableau vertical, et les deux points de vue O et O′ (fig. 58) sur une horizontale et à la même distance du tableau.

A chaque point A correspond deux perspectives conjuguées a et a′ qui sont évidemment sur une horizontale.

Inversement tout système de deux points *a* et *a′* sur une horizontale fixe complètement la position du point objet A.

Traitons une question de pure géométrie, du reste simple.

Avec deux points de vue O et O′, à la distance $\overline{OO'} = D$ l'un de l'autre, à la distance $\overline{OP} = \overline{O'P'} = \Delta$ du tableau, nous obtenons deux perspectives conjuguées.

Elles correspondent à un objet bien déterminé.

Cherchons ce que devient cet objet et dans quelles conditions il subsiste, lorsque nous déplaçons les points de vue et les perspectives les unes par rapport aux autres.

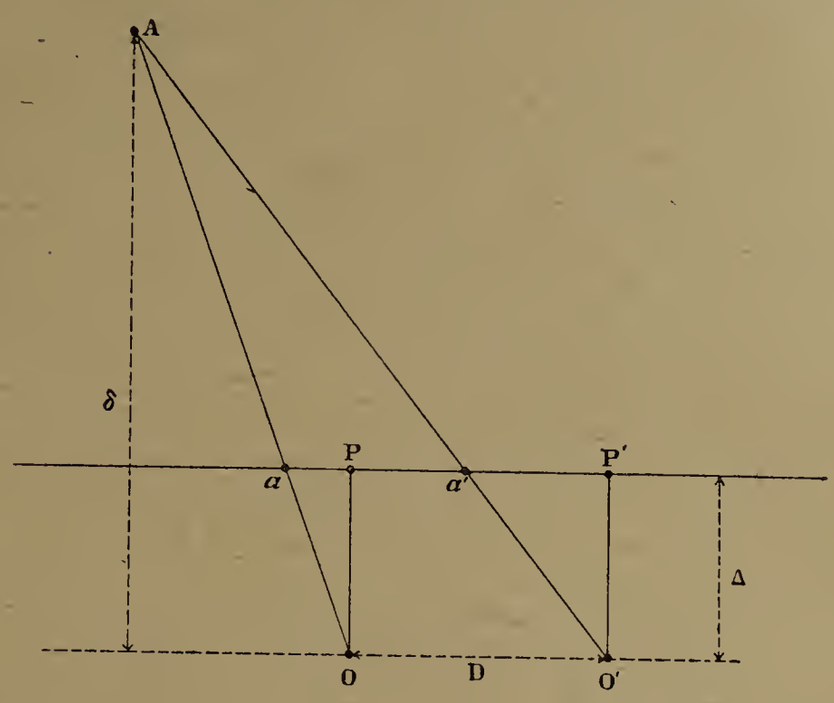


Fig. 58.

Pour éviter des considérations inutiles, supposons que les perspectives demeurent dans le même plan et que les points de vue restent dans un plan parallèle. On a évidemment :

$$\frac{\overline{aa'}}{D} = \frac{\delta - \Delta}{\delta}, \qquad e = D - \overline{aa'} = \frac{D\Delta}{\delta}.$$

e est la *parallaxe stéréoscopique.*

Nulle pour $\delta = \infty$, elle devient égale à D pour $\delta = \Delta$.

Pour qu'à partir des perspectives l'objet soit reconstitué (plus ou moins déformé comme nous allons le voir), il faut que les droites qui vont respectivement des points de vue à *tous* les points homologues des perspectives, se coupent. Nous sommes sûrs qu'il en est ainsi pour la série des cas ci-dessous traités. Au contraire la condition n'est réalisée que pour une partie des points homologues lorsque les perspectives tournent l'une par rapport à l'autre.

75. Déformation de l'objet par déplacement des points de vue ou des perspectives.

1° — Translation des points de vue normale au tableau.

La distance Δ devient Δ_1. Les distances D et $\overline{aa'}$ restant les mêmes. δ varie. D'après la formule établie ci-dessus, on a (fig. 59 à gauche) :

$$\frac{\Delta}{\delta} = \frac{\Delta_1}{\delta_1}.$$

Donc à un plan de front P de l'objet primitif correspond un plan de front P_1 de l'objet déformé. Dans ces plans les figures restent inaltérées; mais les dimensions normales au tableau sont modifiées. Quand on

éloigne les points de vue du plan des perspectives conjuguées, les dimensions antéropostérieures de l'objet croissent : *le relief augmente.*

2° — Translation des points de vue parallèles au tableau.

Soit d'abord une translation horizontale H (fig. 59, à droite).

Les plans de front P et P_1 coïncident; les figures dans ces plans sont

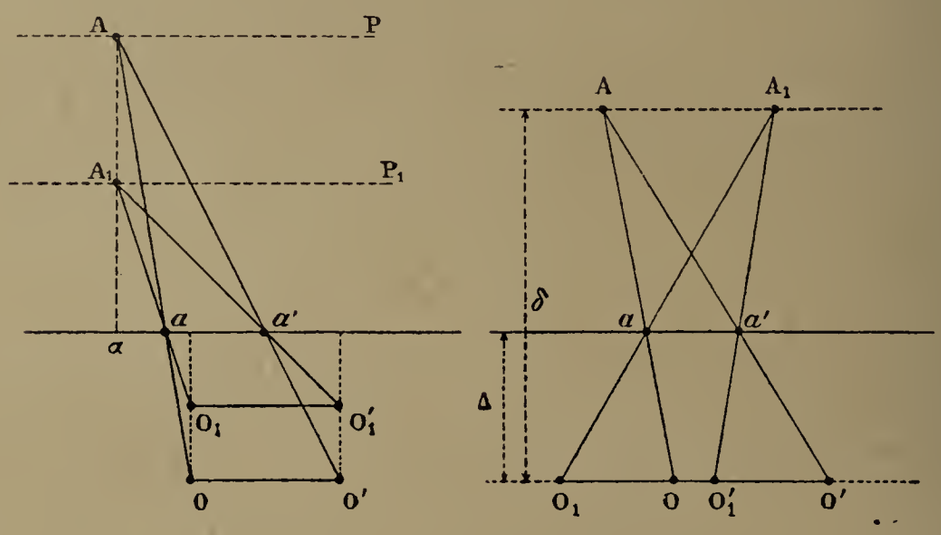


Fig. 59.

inaltérées. Mais elles glissent horizontalement d'une quantité h reliée à H par la formule :

$$\frac{h}{H} = \frac{\delta - \Delta}{\Delta} = \frac{\delta}{\Delta} - 1.$$

Même raisonnement pour un déplacement vertical; on a :

$$\frac{v}{V} = \frac{\delta - \Delta}{\Delta}.$$

De là résulte une modification des angles de l'objet reconstitué. Par exemple, deux perspectives conjuguées qui donneraient un cube pour une certaine position des points de vue, donneront un parallélipipède simplement ou doublement oblique après translation des points de vue parallèlement au tableau. La translation normale au tableau transforme le cube dont une des faces est supposée parallèle au tableau, en un prisme droit à base rectangle.

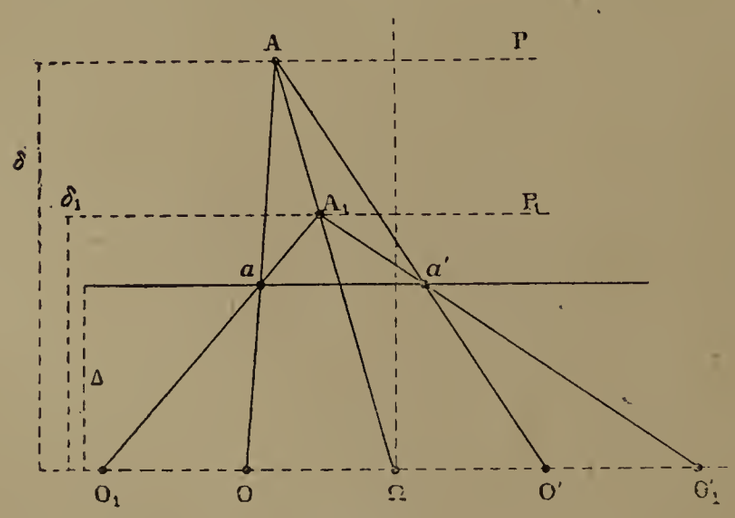


Fig. 60.

3° — Variation de la distance des points de vue.

Il suffit de déplacer O et O' de quantités égales en sens contraires, les déplacements inégaux peuvent être considérés comme résultant de

déplacements égaux et de sens contraires, combinés avec un déplacement horizontal commun (fig. 60).

La formule fondamentale donne :

$$\left(1-\frac{\Delta}{\delta}\right)D=\left(1-\frac{\Delta_1}{\delta_1}\right)D_1, \qquad \frac{D_1}{\delta_1}-\frac{D}{\delta}=\frac{D_1-D}{\Delta}.$$

Un plan de front P est donc transformé en un plan de front P_1.

Les figures dans ces plans ne sont plus identiques; elles sont la projection l'une de l'autre par rapport au point Ω équidistant de O et de O′, ou de O_1 et de O'_1.

4° — Variation de la distance des perspectives.

La formule fondamentale donne (fig. 61) :

$$\frac{1}{\delta_1}-\frac{1}{\delta}=\frac{2\varepsilon}{D\Delta},$$

où ε est le déplacement d'une perspective dans un sens et de l'autre en sens contraire.

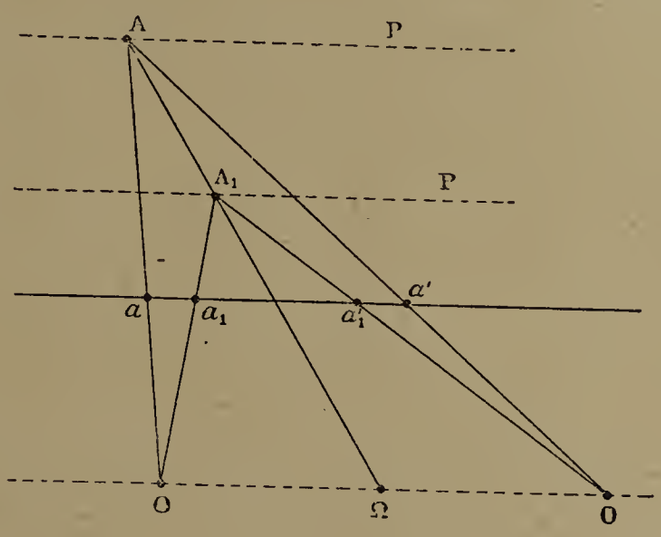


Fig. 61.

Un plan de front P est transformé en un plan de front.

Les figures dans ces plans ne sont plus identiques; elles sont la projection l'une de l'autre par rapport au point Ω équidistant de O et de O′.

5° — Obtention d'un objet semblable.

Faisons simultanément les deux opérations précédentes.

Laissant Δ invariable, modifions D et la distance des perspectives *de manière que les projections des points de vue restent aux mêmes points des perspectives*. Cela revient à écrire :

$$D_1=D-2\varepsilon.$$

Rapprochons les points de vue; δ devient δ_1 :

$$\frac{D-2\varepsilon}{\delta_1}-\frac{D}{\delta}=\frac{-2\varepsilon}{\Delta}.$$

Rapprochons les perspectives d'une quantité égale, δ_1 devient δ_2.

La formule ci-dessus donne (en remplaçant D par $D-2\varepsilon$) :

$$\frac{D-2\varepsilon}{\delta_2}-\frac{D-2\varepsilon}{\delta_1}=\frac{2\varepsilon}{\Delta}.$$

Additionnons : $$\frac{D-2\varepsilon}{\delta_2}=\frac{D}{\delta}.$$

Ainsi après les deux opérations, un plan de front P est transformé en un plan de front P_1 : les distances de ces plans au plan de front des points de vue sont dans un rapport constant. Mais les deux opérations effectuées isolément transforment un point A en un point qui se trouve sur la droite AΩ dont le point Ω est le milieu de $\overline{OO'}$. Donc par les deux

opérations effectuées simultanément l'objet est transformé en un objet semblable. Le centre d'homothétie est le point Ω et le rapport d'homothétie est $(D - 2\varepsilon) : D$.

76. **Reconstitution stéréoscopique.**

1° — Ce qui précède n'est pas discutable; il ne s'agit que de propositions géométriques. Passons au problème physiologique de la reconstitution stéréoscopique.

Reprenons la figure 58. Supposons un tableau vertical et deux points de vue O et O′, sur une horizontale et à la même distance du tableau. Pour préciser, soit $\overline{OO'} = 6$ à 7^{cm}, distance moyenne des pupilles.

Nous obtenons deux perspectives visuelles conjuguées.

Supprimons l'objet, mais laissons les perspectives. Plaçons les pupilles en O et O′. Disposons entre les yeux un écran vertical tel que chacun des yeux n'aperçoive que la perspective qui lui correspond. Pour qu'il en soit ainsi, il faut qu'elles soient assez petites : nous verrons plus loin comment on écarte cette restriction.

L'expérience montre qu'on a la sensation du relief, comme si l'objet existait. Ce n'est pas étonnant puisqu'en définitive rien n'est changé dans les variations de convergence des yeux qui explorent les dessins plans (§ 62).

2° — Il n'est cependant pas exact de dire que rien n'est modifié. Si les variations de convergence sont les mêmes, les variations d'accommodation ne le sont pas, puisque l'accommodation est maintenant invariable; d'où une certaine difficulté pour projeter les perspectives en un solide réel. Tandis que la convergence nous amène à situer telle partie de l'image en avant de telle autre, l'accommodation dément cette indication et les laisse à la même distance des yeux.

Répétons la même chose sous une autre forme, parce que l'étude des stéréoscopes repose sur ces considérations.

Les perspectives proprement géométriques que fournit le solide, sont les traces sur le tableau des pinceaux lumineux qui ont pour sommets les points du solide : ce sont donc des objets lumineux *n'émettant que dans une seule direction*. Nous les remplaçons par des objets lumineux émettant dans toutes les directions. Conséquemment à tout système de perspectives conjuguées peuvent correspondre une infinité de solides *différents parfaitement déterminés* obtenus par déplacement des perspectives dans les plans ou par déplacement des points de vue. Mais il n'existe pour la reproduction correcte de l'objet qu'une position des points de vue, celle même qui a servi à prendre les perspectives.

Heureusement pour la pratique du stéréoscope, l'œil projette les deux perspectives planes sur un objet extérieur inexistant et qui leur sert d'interprétation, *même* quand *géométriquement parlant* les points ne se correspondent pas rigoureusement deux par deux, autrement dit, même lorsque les lignes de visées passant par deux points quasi homologues

respectivement pris dans les perspectives, ne se coupent pas. Il y a toujours une tolérance; *nous voyons en définitive ce que nous voulons voir.*

Heureusement encore les objets n'ont généralement pas une forme géométrique définie *a priori;* leurs petites déformations nous sont indifférentes.

On ne peut expliquer sans ces remarques la théorie du stéréoscope, appareil qui en toute rigueur est un monstre.

3° — Donc si nous offrons à l'œil les perspectives conjuguées, il reconstruit un objet. Il semble d'abord naturel d'admettre que *toutes* les déformations ci-dessus étudiées se produisent pour cet objet, quand nous déplaçons les yeux par rapport aux perspectives, ou les perspectives l'une par rapport à l'autre; mais cela reviendrait à dire que nous apprécions les distances absolues par le degré de convergence actuel de l'œil : la *théorie des projections* que nous savons fausse, reparaîtrait ainsi subrepticement (§ 60 *bis*).

A ce sujet Helmholtz formule son opinion d'une manière dont la prudence ne laisse pas d'amuser. Il cite une expérience de Wheatstone (voir § 81) qui « peut servir à démontrer que, *tant qu'aucune autre circonstance ne s'y oppose*, la convergence des lignes visuelles sert à apprécier la distance absolue des objets et, par conséquent, leur grandeur ». La phrase d'Helmholtz signifie que nous apprécions les distances absolues quand nous les apprécions, ce qui ne nous apprend rien. L'expérience citée doit être interprétée bien différemment : elle prouve que *nous apprécions non les distances absolues, mais les variations de ces distances.* Nous ne devons donc pas nous attendre à ce que la théorie géométrique des déformations ci-dessus exposée s'applique intégralement (§ 75).

Stéréoscopie.

Je vais passer en revue les procédés de reproduction plane donnant la sensation du relief par vision binoculaire (*reproductions stéréoscopiques*).

Je commence par celui de d'Almeida qui, bien que se passant de *stéréoscope* proprement dit, montre nettement la nature du procédé.

77. Dessin bichrome. Perspectives alternées.

1° — Les yeux O_1 et O_2 donnent sur le tableau T deux perspectives différentes A_1 et A_2 de l'objet A.

Dessinons-les sur fond noir avec des lignes rouges pour A_1, bleues pour A_2; armons les yeux d'un binocle dont les verres sont : l'un rouge pour l'œil O_1, l'autre bleu pour l'œil O_2.

L'œil droit ne voit que la perspective droite, l'œil gauche ne voit que la perspective gauche : d'où la sensation du relief.

On peut imprimer les dessins en deux couleurs *sur fond noir*. On peut aussi projeter sur un même écran, à l'aide de deux lanternes de projection, des diapositifs colorés en rouge et en bleu; les spectateurs sont armés de binocles bichromes : chaque œil ne voit que la perspective qui lui correspond.

La partie essentielle des procédés stéréoscopiques est contenue dans la phrase soulignée : il s'agit toujours de présenter respectivement aux yeux des perspectives différentes, de telle sorte que chaque œil ne voit que celle qui lui convient.

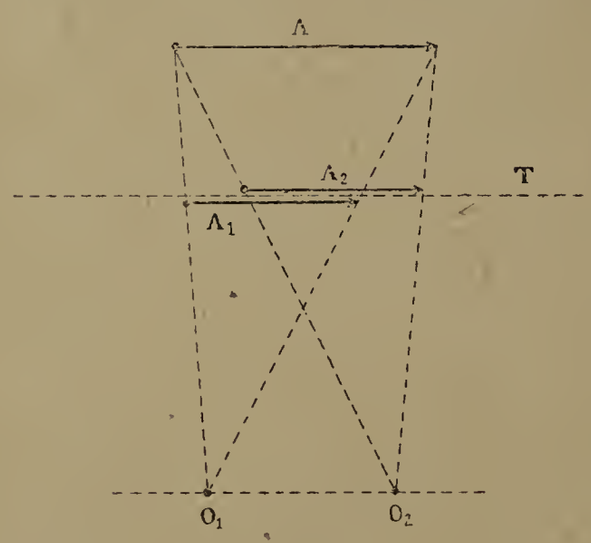


Fig. 62.

On peut réaliser les conditions énoncées avec un obturateur tournant. C'est un système de disques percés de trous au moyen duquel on découvre *successivement* et un grand nombre de fois par seconde l'œil droit ou l'œil gauche, et *simultanément* on projette la perspective qui correspond à l'œil droit ou à l'œil gauche.

Dans ce cas il n'est plus nécessaire que les projections soient colorées. A la vérité les images ne sont plus permanentes, mais il importe peu en raison de la persistance des impressions visuelles (§ 163).

2° — Le problème est de savoir quelle relation existe entre l'objet qui a servi à obtenir les perspectives, et l'objet restitué.

Il y a identité si les conditions implicitement posées ci-dessus sont réalisées. Mais autant dire qu'elles ne le sont jamais. Insistons, car les mêmes remarques s'appliquent à tous les procédés stéréoscopiques.

Nous supposons que les perspectives sont projetées sur le tableau, en grandeur et position relative, telles qu'elles seraient obtenues en prenant les points de vue en O_1 et O_2 où se trouvent les points nodaux antérieurs des yeux. Mais rien ne nous empêche de nous déplacer par rapport au tableau et d'écarter plus ou moins l'une de l'autre les perspectives que nous projetons. Aux déplacements relatifs correspondent des déformations de l'objet restitué, déformations ci-dessus étudiées. Rien ne nous empêche aussi de prendre les perspectives projetées en supposant aux yeux un écartement différent de l'écartement moyen.

Bref nous voyons en relief un objet qui n'a généralement qu'un lointain rapport avec la réalité. L'expérience prouve que cela n'a aucun inconvénient, les yeux montrant une tolérance dont la cause principale est l'ignorance de la forme *exacte* des objets : pourvu que la déformation ne soit pas caricaturale, nous nous déclarons satisfaits.

En définitive ne demandons pas à la vision stéréoscopique une préci-

sion généralement impossible à réaliser et *qui ne présente aucun intérêt quand elle est possible.*

Encore supposons-nous dans ce qui précède que la vision stéréoscopique restitue un objet bien déterminé, conformément à la théorie géométrique des §§ 74 et suivants.

En réalité tant s'en faut qu'il en soit ainsi : la distance de l'objet restitué reste généralement indéterminée; seul est déterminé son relief. C'est ce que prouvent les expériences suivantes.

78. Dissociation du relief et de la position absolue.

1° — Elles sont particulièrement instructives et ne demandent aucun appareil spécial.

Supposons comme précédemment les yeux en O_1 et O_2, le tableau

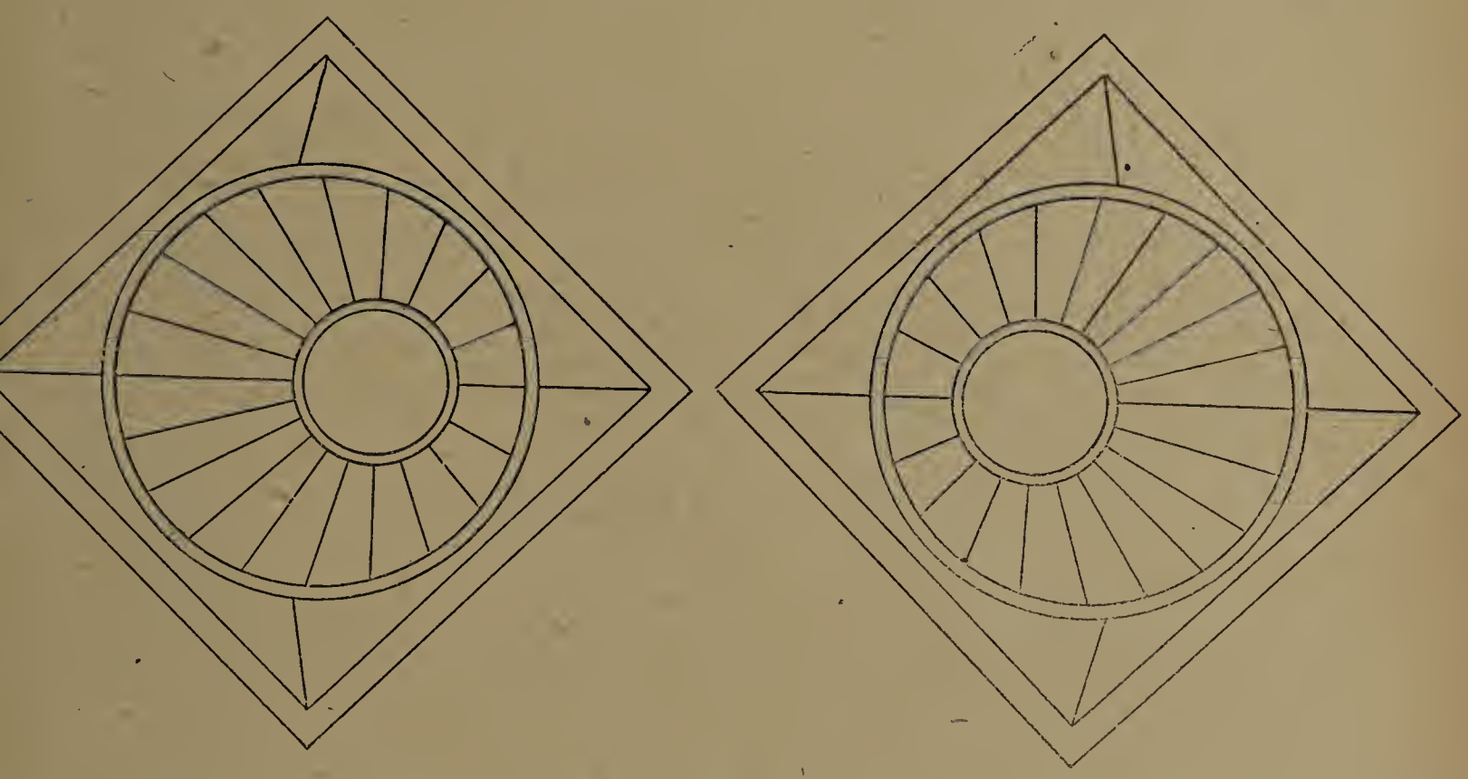


Fig. 63.

en T et les perspectives de l'objet dessinées sur le tableau (fig. 62). Pour préciser supposons le tableau au delà de la distance minima de vision distincte, de manière que les perspectives soient vues sans fatigue. *Qu'arrive-t-il si nous écartons les perspectives l'une de l'autre jusqu'à les séparer?*

L'expérience montre que l'on continue à les fusionner, et que la sensation du relief subsiste à peu près sans modification.

Avant d'aborder l'explication de ce curieux phénomène, il est nécessaire que le lecteur s'exerce à réaliser l'expérience. Pour la faciliter, j'ai fait dessiner deux cônes en double perspective (fig. 63 et 64). Il armera ses yeux d'une paire de binocles à verres convergents, de distances focales par exemple comprises entre 10 et 30 centimètres. Il placera le dessin double à une distance de ses yeux telle qu'il le voie sans fatigue,

puis disposera devant son nez un morceau de carton noirci empêchant l'œil droit de voir la perspective gauche, l'œil gauche de voir la perspective droite.

Il commencera par avoir la sensation de deux images différentes.

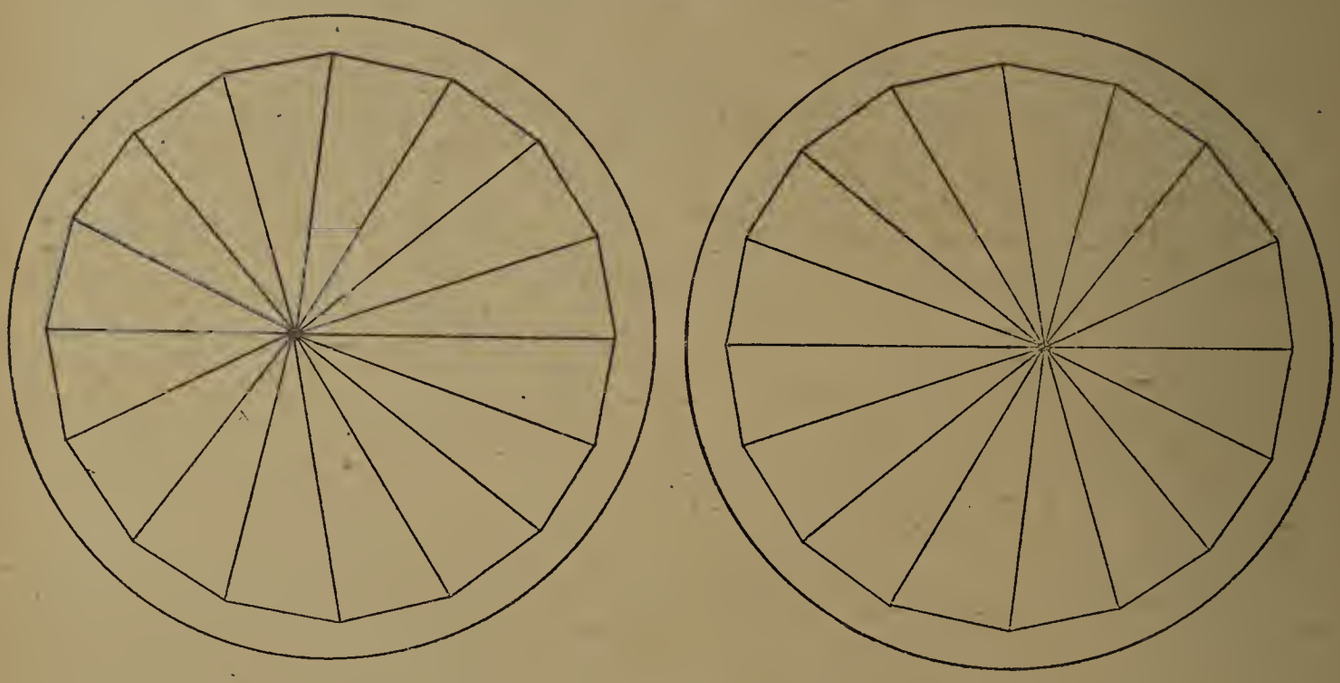


Fig. 64.

Cela tient à ce que généralement on ne sait pas dissocier l'accommodation de la convergence; d'où résulte qu'on regarde avec les deux yeux *successivement* chacune des images. Mais peu à peu les images semblent marcher l'une vers l'autre et brusquement fusionnent en donnant la sensation du relief. Alors on finit d'orienter convenablement le dessin de manière à supprimer la diplopie qui subsisterait et qu'on rétablit à volonté en faisant tourner le dessin de quelques degrés à partir de l'azimut optimum.

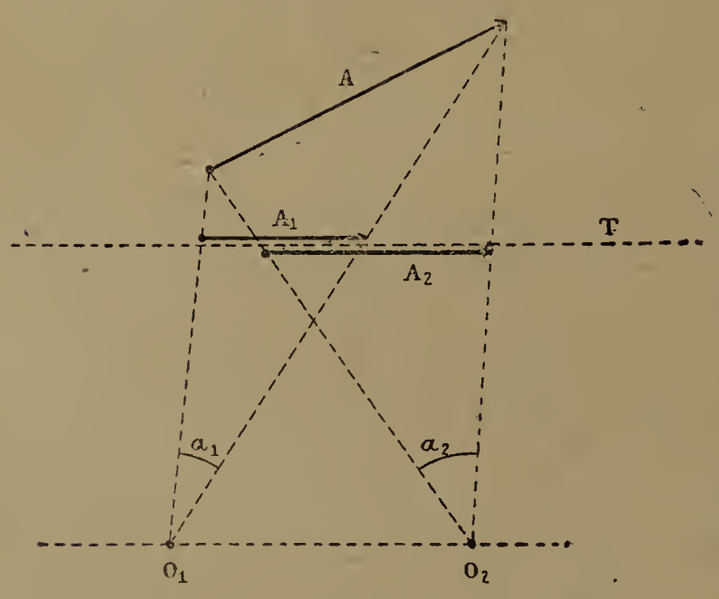


Fig. 65.

2° — Il est paradoxal que le relief subsiste inchangé quel que soit l'écartement des perspectives conjuguées (à la seule condition qu'on ne dépasse pas la distance des pupilles, ce qui exigerait un strabisme divergent pour la vision simultanée des perspectives).

Nous retrouvons ici ce que nous avons déjà dit sur l'impossibilité de déterminer la distance absolue par la vision binoculaire; elle ne fournit que les distances *relatives* (§ 61).

Nous reconnaissons par exemple que la flèche A est inclinée sur le tableau T (fig. 65) à ce que ses perspectives A_1 et A_2 sont inégales, ou, ce qui revient au même, à ce que les angles α_1 et α_2 dont il faut faire tourner respectivement les lignes visuelles pour aller d'un bout à l'autre de ces perspectives, sont inégaux. Or le rapport $\alpha_1 : \alpha_2$ change peu, ne change pas à la précision de l'appareil de mesure, quand on déplace les perspectives A_1 et A_2 dans le tableau. Donc l'angle que fait la flèche A avec le tableau, reste inaltéré par le déplacement des perspectives : ce qui revient au même, le relief ne change pas.

Toujours avec la même précision limitée, il ne change pas davantage quand on rapproche ou qu'on éloigne le tableau, les angles α_1 et α_2 augmentant ou diminuant alors sensiblement dans le même rapport. On explique ainsi le paradoxe d'un objet situé à une distance indéterminée et dont le relief semble à peu près invariable.

Cette expérience est en contradiction absolue avec la *théorie des projections* (§ 60 *bis*).

79. Association des dessins.

Quand on offre aux yeux des dessins dissemblables, en vertu de quel principe les associent-ils ? pourquoi choisissent-ils telle partie de l'un pour la conjuguer à telle partie de l'autre ?

L'expérience montre qu'ils assimilent les traits qui fournissent par leur assemblage un objet reconnaissable et usuel.

1° — Voici une première expérience (fig. 66).

On présente à l'œil droit D une verticale V, à l'œil gauche G l'inclinée

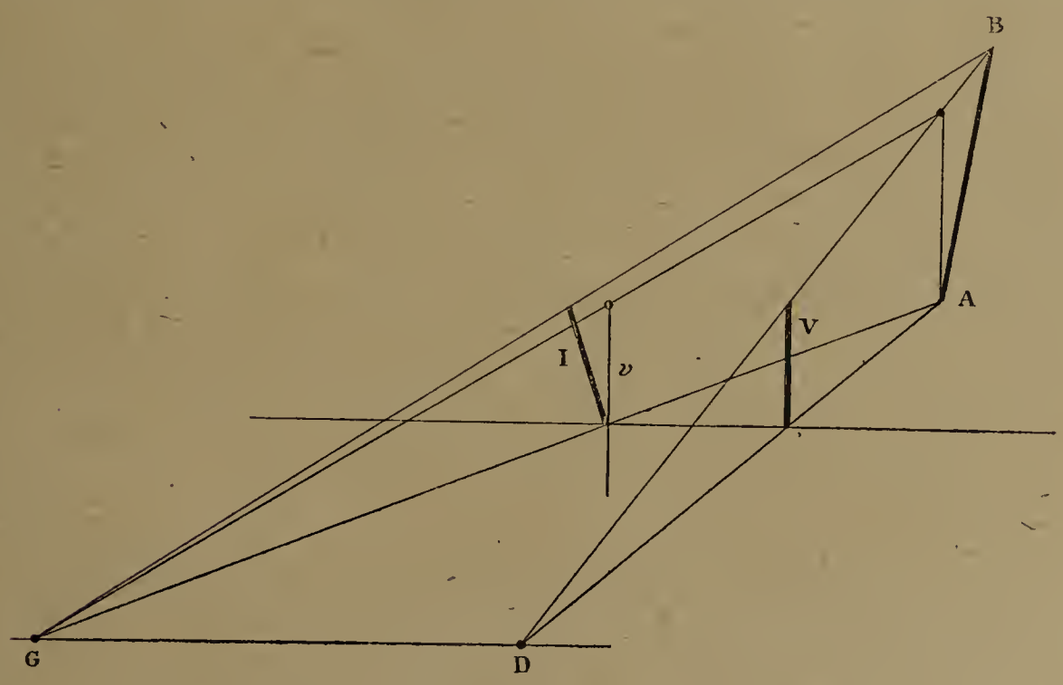


Fig. 66.

de même épaisseur I ; ils les associent en une droite AB dont les extrémités A et B ne sont pas à la même distance de l'observateur.

Traçons par le milieu de I une verticale *v plus fine* que V. Les yeux

se refusent à associer V et *v*; *v* est vu pour son propre compte, tandis que V et I continuent à être fusionnées en la droite AB. Les yeux préfèrent associer les traits de même épaisseur comme ayant plus de chance d'être les perspectives du même objet. Au surplus la ligne *v* qui coupe la ligne I, apparaît coupant la ligne AB.

Dessinons deux verticales épaisses, puis une troisième plus fine.

Les lignes verticales épaisses sont fusionnées; mais la troisième ligne ne subit plus de changement de place.

2° — Lorsque la fusion est impossible, une des images est neutralisée (§ 50). Voici un exemple entre une infinité. Une double photographie montre le porche de Notre-Dame. Sur l'une des images est un fiacre attelé d'un cheval noir; par les portières ouvertes, on voit une affiche collée sur des échafaudages. Sur l'autre image est une voiture fermée attelée d'un cheval blanc. La fusion est impossible. Corrélativement les uns voient le fiacre, le cheval noir et l'affiche; les autres voient le cheval blanc et ne voient pas l'affiche. Les images des voitures ne pouvant servir à construire une image totale, l'une d'elles est supprimée. Cependant on ne néglige pas *en entier* l'une des images, puisque la sensation du relief continue d'exister pour le monument lui-même.

Cette expérience, répétée d'une infinité de manières, prouve que nous pouvons neutraliser *une partie* des sensations de l'un des yeux; ce qui n'est explicable que si nous ne voyons les objets que par fragments successifs, comme le veut la théorie de Brücke, Prévost, Brewster (§ 62).

3° — Voici une troisième expérience non moins instructive.

Offrons respectivement aux yeux deux circonférences de rayons peu différents : nous voyons une circonférence *unique* de rayon intermédiaire. Voici l'explication de Brücke.

On juge de la grandeur des objets par les efforts musculaires pour en fixer successivement les divers points. Ici les efforts musculaires nécessaires pour fusionner successivement les points des cercles, sont intermédiaires à ceux qui le seraient pour le grand cercle ou pour le petit. D'où la grandeur apparente du cercle unique, intermédiaire de celle des constituants.

Cette expérience est encore contradictoire de la théorie par laquelle nous percevons les images en bloc. Perçues en bloc, elles ne pourraient fusionner.

80. **Stéréoscopes. Stéréoscope de réflexion (Wheatstone).**

1° — Les expériences précédentes exigent un apprentissage à la vérité très court; il faut dissocier la convergence et l'accommodation. Cette dissociation est du reste inutile si pour un écartement donné des perspectives, on place le double dessin à une distance des yeux recouverts de besicles telle que la convergence et l'accommodation se correspondent. Par exemple, les perspectives sont l'une de l'autre à la distance des pupilles; on suppose les yeux emmétropes : on place les

dessins dans les plans focaux principaux des verres; autrement dit, on renvoie les images à l'infini.

Pour facile que soit l'expérience, on ne saurait l'imposer au public : d'où l'invention des *stéréoscopes*. Il est important de remarquer *qu'ils n'ajoutent absolument rien à la sensation du relief*; ils ne servent qu'à faciliter une fusion qu'un peu d'exercice rend aisée sans leur secours.

Le plus simple des stéréoscopes et le premier en date est dû à Wheatstone (1839).

Les yeux sont en O_1 et O_2 (fig. 67).

Le tableau sur lequel ils projettent les objets, est en T.

Les perpectives sont différentes : supposons les dessinées.

Nous verrons l'objet avec son relief si nous trouvons le moyen de lui

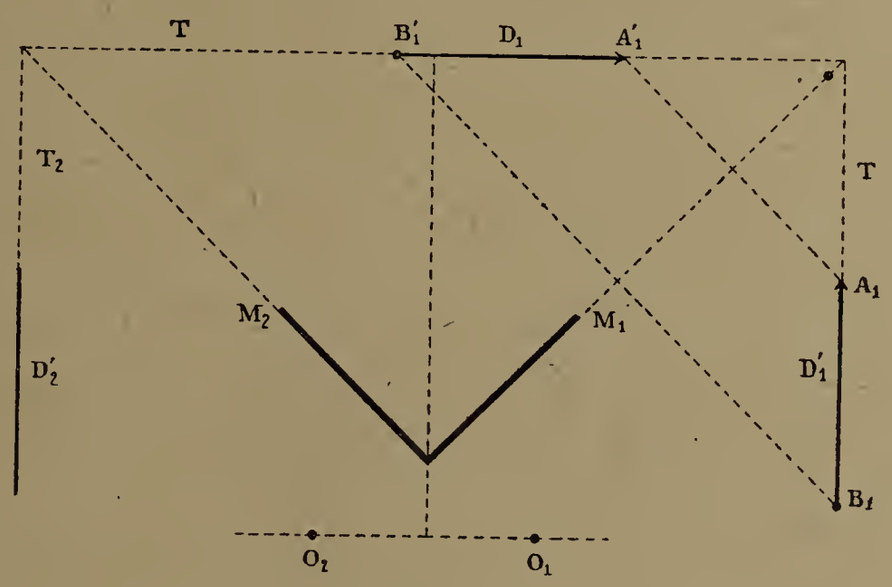


Fig. 67.

substituer les perspectives D_1 et D_2, *l'œil droit ne voyant que la projection droite, l'œil gauche ne voyant que la gauche.*

Pour cela utilisons deux miroirs à 45°, M_1 et M_2; en D'_1 et D'_2, sur les plans T_1 et T_2 conjugués de T par rapport aux miroirs, plaçons les images D'_1 et D'_2 des perspectives D_1 et D_2. Les déplacer dans les plans T_1 et T_2 revient à déplacer leurs images D_1 et D_2 dans le plan du tableau. On obtient ainsi facilement une convergence en rapport avec l'accommodation. D'après le § 78, il existe du reste la plus grande tolérance dans la réalisation de cette condition.

81. **Expérience de Wheatstone.**

Voici l'expérience de Wheatstone annoncée au § 76.

Utilisons son stéréoscope; déplaçons les dessins dans les plans T_1 et T_2 de manière à modifier la convergence (la grandeur des images restant invariable). Wheatstone trouve que la grandeur et la distance apparentes de l'objet reconstitué diminuent au moment où la convergence augmente; et inversement.

Cette expérience prouve que nous apprécions, non la convergence et

la distance absolues, mais les variations de la convergence, partant celles de la distance. Si l'objet semble se rapprocher, quand la convergence augmente, nous interprétons l'invariabilité de sa grandeur apparente comme une diminution de la grandeur réelle. Rien dans cette expérience n'est opposable aux adversaires de la *théorie des projections* (§ 60 *bis*).

On observe une diminution ou un grossissement analogues des objets reconstitués, à partir de toute paire de dessins stéréoscopiques qu'on fusionne directement ou dans un stéréoscope : il suffit de les rapprocher ou de les éloigner l'un de l'autre. Il s'agit toujours-là de variations et non de grandeurs absolues.

Que le lecteur remarque bien les termes dont nous nous servons. La grandeur de l'image reconstituée n'est pas fonction de la variation de cette grandeur qui est fonction de la variation de la convergence. Un instant après que la variation a été réalisée, nous perdons le sentiment de la grandeur, par suite de la variation qu'elle vient d'éprouver.

82. Stéréoscope à quatre miroirs.

L'inconvénient du stéréoscope de Wheatstone est le retournement dû à la réflexion : le dessin D_1' n'est pas identique à la perspective D_1 ; il lui est symétrique par rapport à un plan.

On évite ce retournement au moyen de quatre miroirs M (fig. 68)

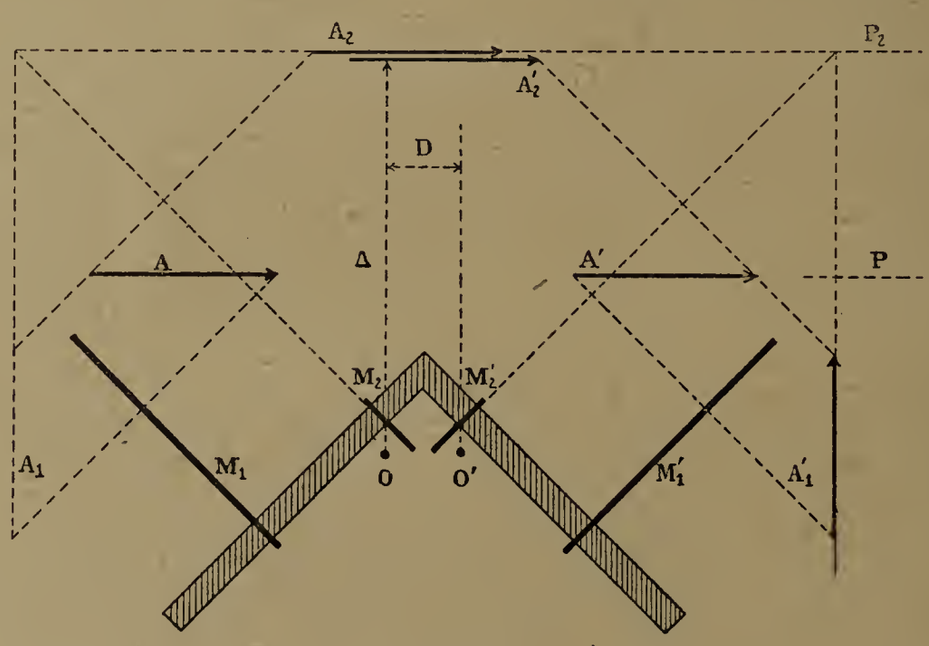


Fig. 68.

deux à deux parallèles et deux à deux rectangulaires. Les miroirs M_1 et M_1' sont mobiles sur des règles graduées. Les dessins sont en A et A' dans le plan P ; leurs images sont en A_2 et A_2' dans le plan P_2. La distance des plans P et P_2 est égale à $\sqrt{2}$ fois la distance d des miroirs M_1 et M_2, M_1' et M_2.

Le déplacement latéral des images A_2 et A'_2 respectivement par rapport à A et A' est égal à la même quantité. On peut donc éviter l'empiétement

des clichés ou des dessins A et A′ étudiés, tout en superposant leurs images.

Quand la distance Δ des yeux au plan P_2 est incompatible avec une facile accommodation, on regarde à travers des lentilles appropriées. Par exemple on utilise une boîte de verres et les besicles à verres interchangeables qu'elle contient généralement.

Helmholtz donne à cet appareil le nom de *téléstéréoscope :* voici pourquoi. Supposons qu'on s'en serve pour regarder un paysage. Tout se passe comme si les yeux (supposés placés contre les miroirs M'_1 et M'_2) étaient éloignés latéralement de $\sqrt{2}\,d$. Le relief est donc amplifié : un paysage apparaît comme un modèle d'une finesse d'exécution et d'une exactitude admirables (§ 63).

On peut remplacer les quatre miroirs par des prismes à réflexion totale.

83. Stéréoscope de réfraction (Brewster).

1° — Les yeux sont en O et O′; le tableau sur lequel se forment censément les perspectives A et A′, est en T. Comme précédemment, le

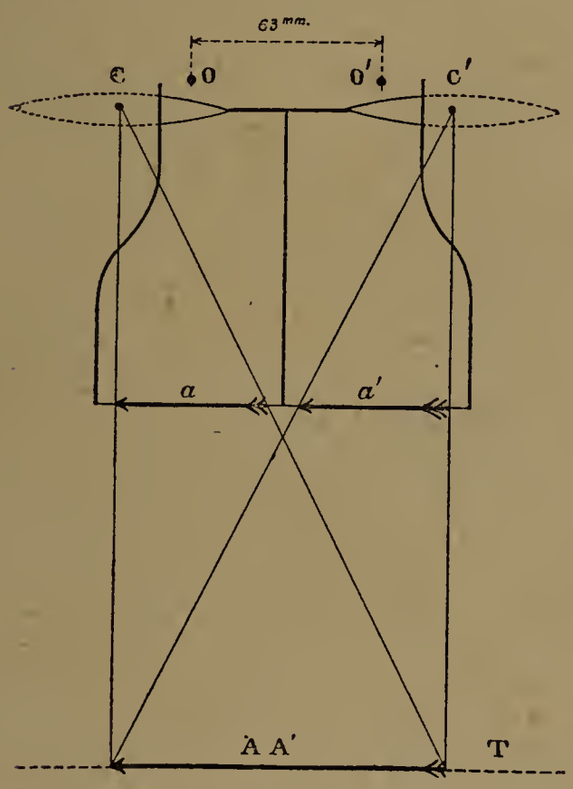


Fig. 69.

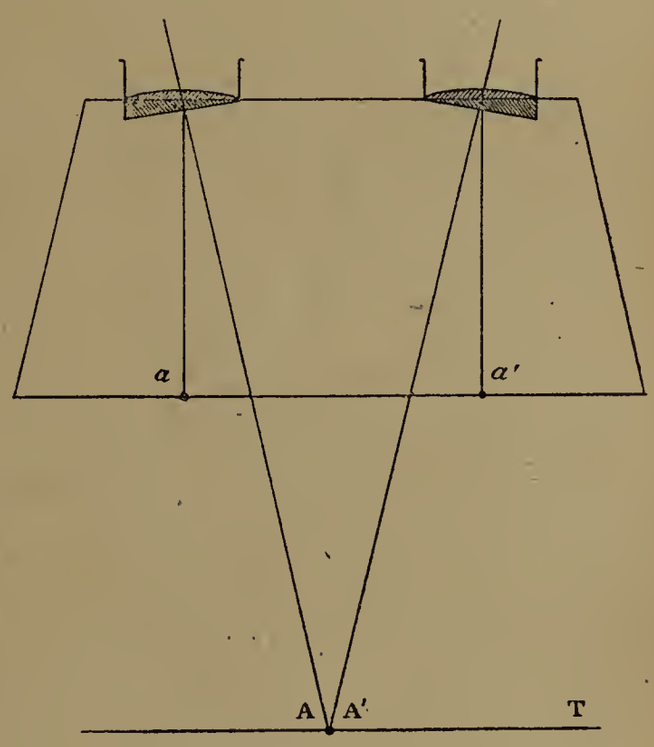


Fig. 70.

problème est d'obtenir que l'œil droit ne voie que la perspective droite, l'œil gauche que la perspective gauche.

Pour cela on remplace les perspectives A et A′ par des dessins *a* et *a′* qui les restituent quand ils sont vus à travers les lentilles C et C′.

Les lentilles ont environ 16 centimètres de distance focale principale; les dessins *a* et *a′* sont placés côte à côte à 12 centimètres des lentilles, de sorte que leurs images virtuelles A et A′ se forment à 50 centimètres

environ. Tout se passe pour les yeux O′ et O′ comme si les lentilles et les dessins étaient supprimés, et comme s'il existait dans le plan T les perspectives A et A′ qui correspondent respectivement aux deux yeux.

Peu importe l'écartement des pupilles; il est en moyenne de 63 millimètres, mais il varie notablement d'un individu à l'autre.

Les lentilles ne servant pas dans leur entier, on supprime généralement les parties inutiles représentées en pointillé. La distance des centres optiques CC′ est ordinairement égale à 8 centimètres.

On remplace parfois ce dispositif par deux lentilles de petites dimensions accouplées à deux prismes d'angle convenable. Les prismes donnent des dessins des images virtuelles qui servent d'objets réels pour les lentilles (fig. 70).

84. Stéréoscopie d'objets admettant pour plan de symétrie celui du corps de l'observateur.

Si l'objet regardé possède comme plan de symétrie P celui du corps de l'observateur (c'est-à-dire un plan vertical passant par le bout du nez et coupant la tête en deux parties égales), les perspectives sur un tableau vertical normal au plan P et qui correspondent respectivement aux deux yeux, sont symétriques par rapport au plan P.

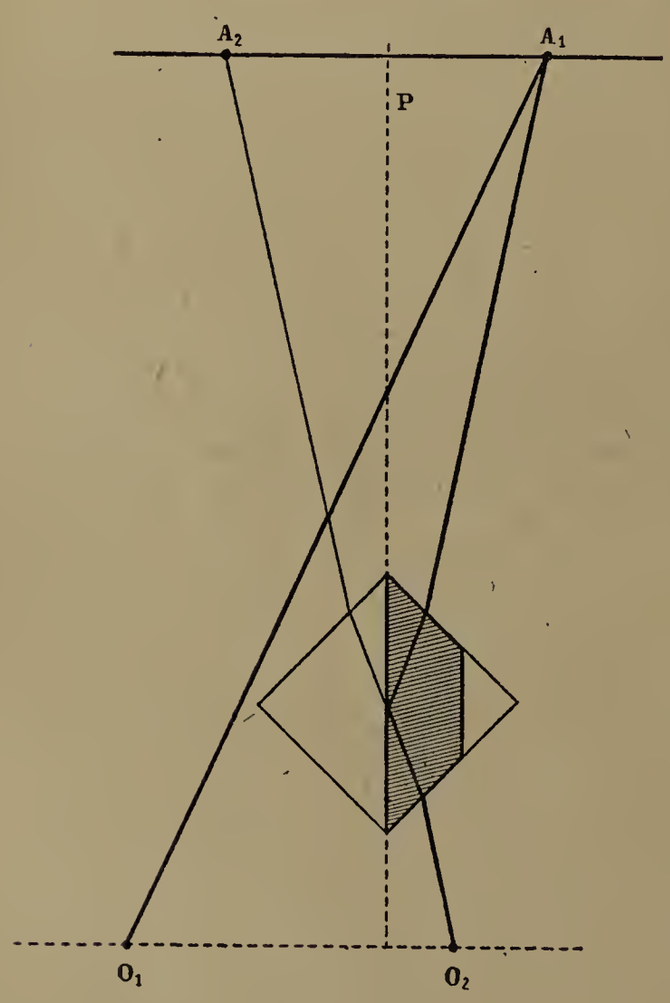


Fig. 71.

C'est le cas des figures 63 et 64.

Il est alors possible de se contenter d'un seul dessin A_1 qu'un des yeux O_1 voit directement, que l'autre O_2 voit en A_2 par réflexion sur un miroir ou dans un prisme à réflexion totale : l'image A_2 est symétrique de A_1 par rapport au plan P. A la vérité les yeux ne sont pas rigoureusement à égale distance de ce plan; mais l'erreur qui résulte de cette inégalité n'a pas d'importance.

Par ce moyen on peut obtenir la sensation de relief avec des dessins qui ne sont pas destinés à cet usage, par exemple avec des photographies prises à peu près de face.

En changeant l'œil qui est armé du prisme à réflexion totale, on produit le renversement du relief (§ 87).

85. **Monostéréoscope (Claudet).**

1° — C'est un fait curieux que l'image formée sur le verre dépoli d'une chambre noire présente un relief incontestable. Il est dû à ce que la visibilité par transparence d'une telle image diminue rapidement quand on regarde dans une direction inclinée sur la direction d'incidence.

De là résulte qu'en supposant les yeux équidistants du centre du verre dépoli, l'œil droit voit à peu près uniquement l'image formée par la partie gauche de l'objectif, l'œil gauche voit à peu près uniquement l'image formée par sa partie droite.

Or, c'est un point qu'à tort on ne remarque pas assez, dès que l'objet a du relief, les images formées par les diverses régions de l'objectif (même supposé parfait) ne sont plus identiques. Comme le verre dépoli les sépare pour la vision binoculaire, il y a relief.

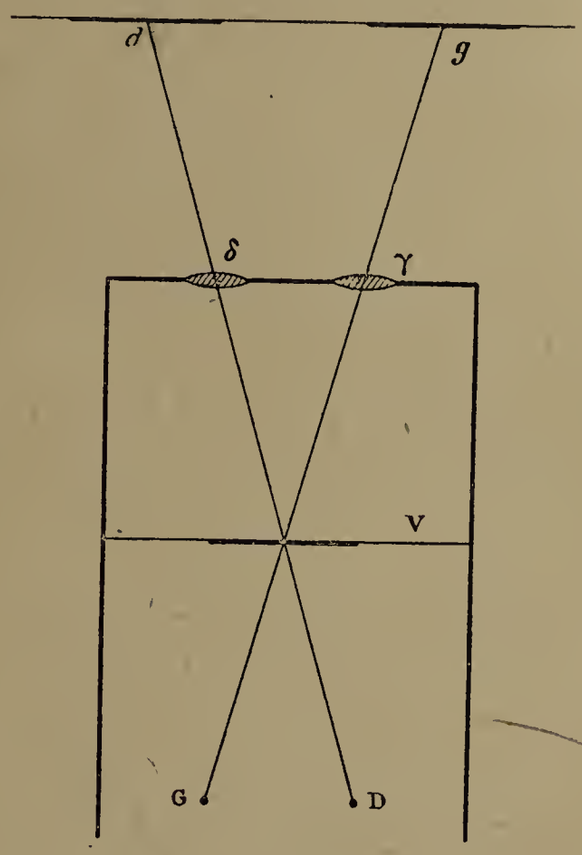


Fig. 72.

2° — Sur ce principe Claudet a construit un singulier stéréoscope.

Plaçons en *d* et *g* les diapositifs qui correspondent à l'œil droit D et à l'œil gauche G. Projetons-les avec les objectifs δ et γ au même endroit d'un verre dépoli V. On réalise parfaitement ainsi la sensation du relief : l'œil gauche ne voit que l'image donnée par l'objectif droit, et inversement.

86. **Déformations stéréoscopiques.**

1° — Quand on regarde dans un stéréoscope des courbes tournant leur concavité l'une vers l'autre (fig. 73), elles fusionnent en une courbe ABC qui est concave vers l'observateur.

A l'inverse quand les courbes tournent l'une vers l'autre leur convexité, elles fusionnent en une courbe dont la convexité est tournée vers l'observateur.

Ceci posé, utilisons deux prismes de 8 à 10°; tournons leurs arêtes l'une vers l'autre et regardons une fenêtre à travers le système. En louchant nous arrivons aisément à superposer les images : l'expérience *qu'elles fusionnent en dressant une fenêtre concave vers l'observateur.*

L'explication du phénomène est simple.

Les prismes donnent des images virtuelles F_1, F_2, avec lesquelles les yeux reconstitueraient binoculairement la fenêtre F telle qu'elle est, si les images n'étaient pas déformées. Mais elles le sont : les barreaux

verticaux sont vus *courbés*, la convexité vers la base du prisme, comme

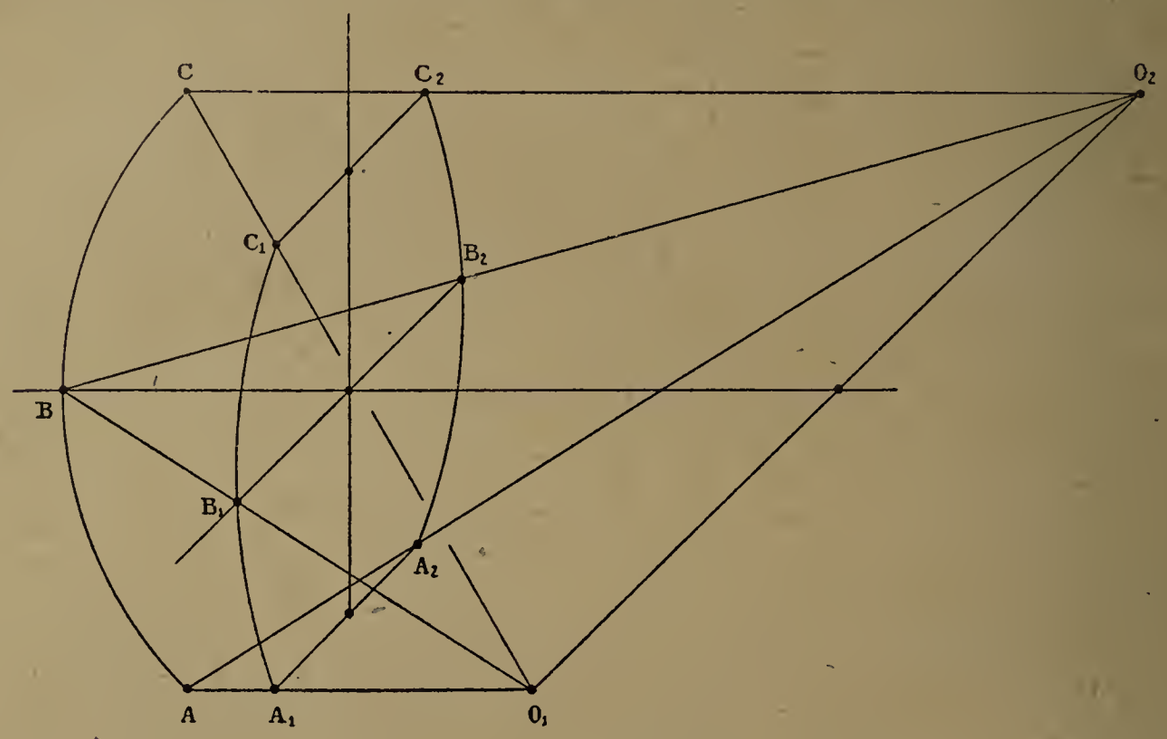


Fig. 73.

l'indique la figure 74. Par suite la reconstitution binoculaire donne une fenêtre concave vers l'observateur.

Même explication pour l'apparence concave que présentent les vues stéréoscopiques dans certains stéréoscopes à prismes mal étudiés.

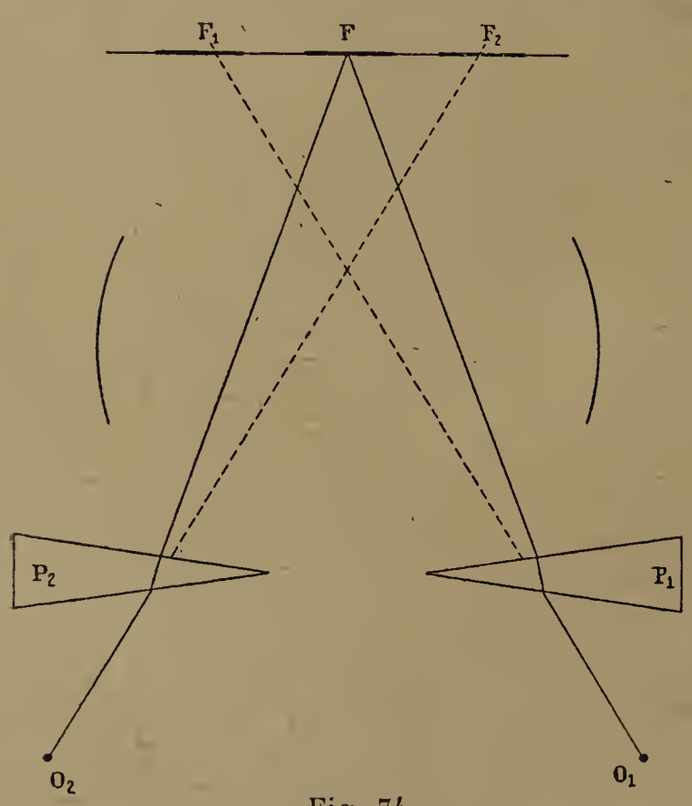


Fig. 74.

2° — On peut réaliser l'expérience d'une autre manière.

Projetons les barreaux verticaux d'une fenêtre avec une lentille de grande ouverture; l'image manque de netteté parce que les différents éléments de la lentille ne donnent pas des images identiques situées au même endroit.

En particulier diaphragmons la lentille par un écran percé d'un trou T_1 à l'une des extrémités du diamètre horizontal : nous obtenons une image dans laquelle les verticales sont tordues comme en I_1.

Avec le trou T_2 à l'autre extrémité du diamètre horizontal, les images sont tordues comme en I_2.

Ceci posé, faisons deux diapositifs dans les conditions précédentes; regardons-les dans un stéréoscope. Nous obtenons une image cylindrique convexe ou concave suivant l'épreuve que nous plaçons devant l'œil droit ou devant l'œil gauche.

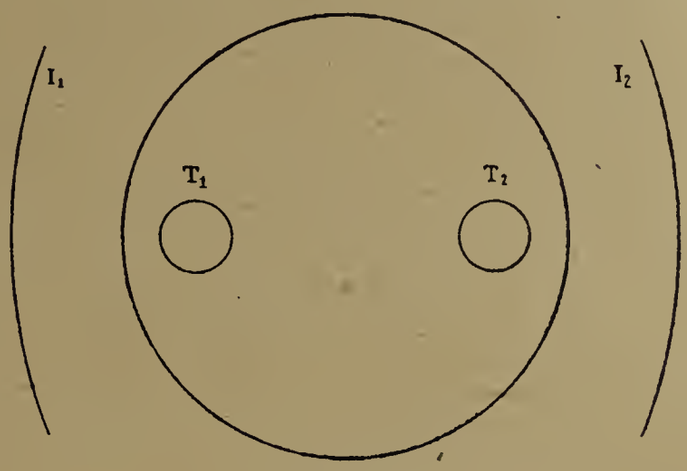


Fig. 75.

87. **Pseudoscopie.**

1° — On trouve dans tous les traités la phrase suivante ou une phrase analogue :

Quand on place devant l'œil droit l'image qui correspond à l'œil gauche, et inversement, le relief est renversé : les creux sont remplacés par des pleins et inversement.

Cette proposition ne signifie rien, ne serait-ce qu'en raison de l'espace infini qui est derrière le corps et qu'on ne peut évidemment pas ramener

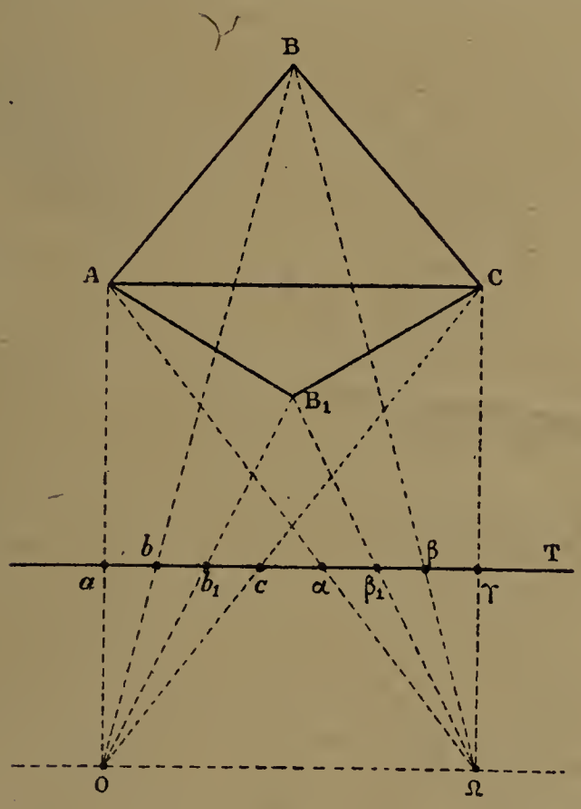


Fig. 76.

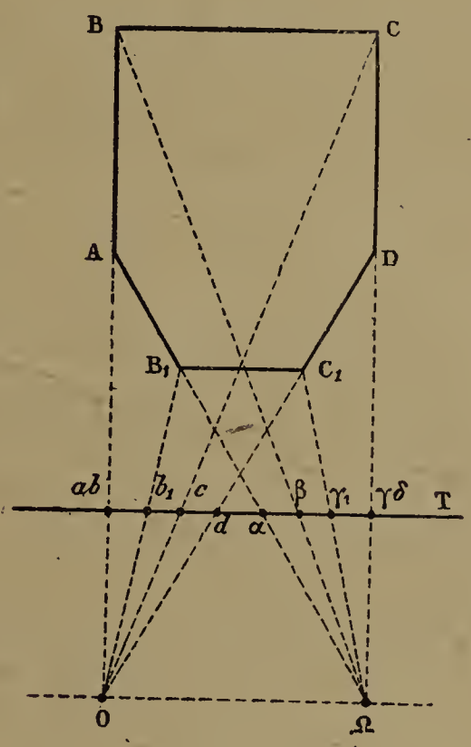


Fig. 77.

en avant. D'une manière générale, l'opération fournit une figure qui n'a qu'un lointain rapport avec la figure primitive; ce qu'il est facile de montrer sur des cas simples.

Les perspectives qui correspondent à l'objet ABC (fig. 76) pour les yeux O et Ω, sont *abc* et $\alpha\beta\gamma$. Échangeons-les; nous obtenons les perspectives ab_1c, $\alpha\beta_1\gamma$, qui correspondent à l'objet AB_1C.

Au lieu d'un angle creux ABC, nous avons maintenant un angle sail-

lant AB_1C. Mais les deux angles ne sont pas égaux; l'angle AB_1C est obtus tandis que ABC est aigu.

Comme second exemple, soit l'objet ABCD (fig. 77).

Intervertissons les perspectives *abcd*, $\alpha\beta\gamma\delta$; nous obtenons ab_1d et $\alpha\gamma_1\delta$ qui correspondent à l'objet AB_1C_1D. La déformation est considérable.

Si donc parfois les corps convexes paraissent concaves et inversement, les déformations sont énormes. Au surplus l'expérience réussit généralement assez mal, l'illusion étant détruite par la connaissance que nous avons de la forme des objets.

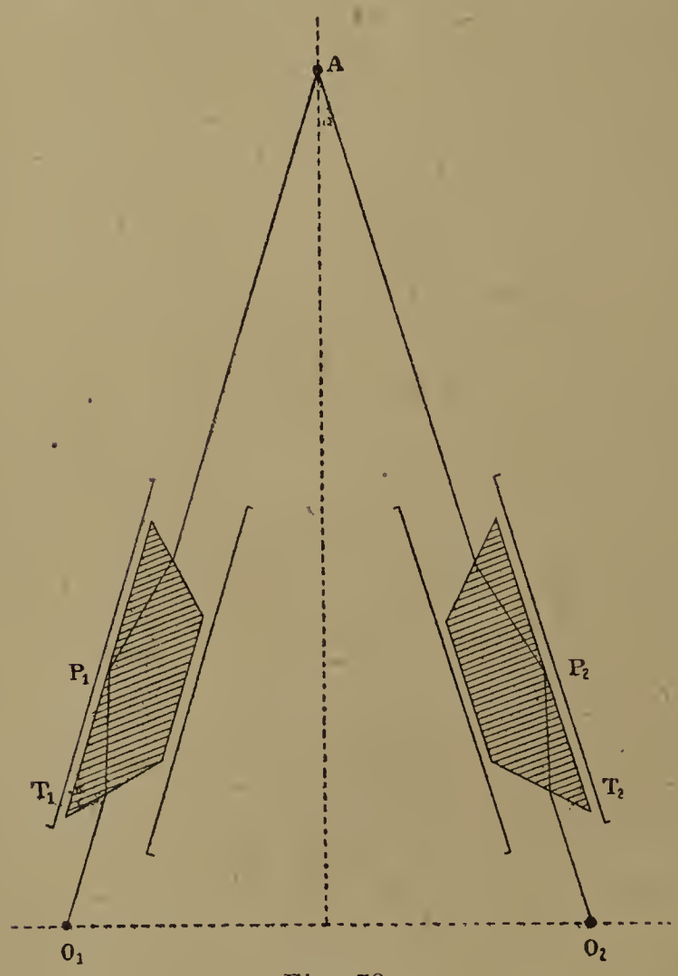


Fig. 78.

2° — Pour regarder pseudoscopiquement un objet réel A, on se sert de deux prismes P rectangles, renfermés dans deux tubes T de manière que leurs hypoténuses soient parallèles aux axes de ces tubes (fig. 78). Ceux-ci sont respectivement mobiles autour de leur axe et autour d'un axe perpendiculaire au plan de visée (plan de la figure); on peut ainsi amener en coïncidence les images de l'objet A.

Les objets dont on veut renverser le relief, doivent être placés librement dans l'espace de manière qu'il n'y ait pas d'ombres portées détruisant l'illusion. L'expérience réussit bien avec une éprouvette graduée; les divisions paraissent en arrière si elles sont effectivement en avant. On recommande aussi des fils verticaux situés à différentes distances de l'observateur.

88. Photographies stéréoscopiques.

La stéréoscopie n'a d'intérêt industriel qu'en raison de la facilité d'obtention des perspectives conjuguées au moyen de la photographie.

On utilise des chambres photographiques divisées en deux parties par une cloison noircie et portant deux objectifs aussi identiques que possible, d'axes principaux parallèles. Ils sont situés à une distance généralement variable à l'aide d'une vis à pas inverses, égale en moyenne à 70 millimètres. Dans l'appareil que j'ai sous les yeux, la distance des axes peut aller de 64 à 100 millimètres.

Le Congrès de photographie a posé que les épreuves stéréoscopiques seraient du format 70 × 136 millimètres et constituées par deux vues de 70 × 66 millimètres séparées par un intervalle de 4 millimètres. Les deux vues sont généralement obtenues sur le même cliché rectangulaire. Faut-il répéter que l'exactitude de la reproduction (à la supposer réalisable) est le cadet des soucis des photographes? Toutes les belles choses qu'on nous débite à cet égard, sont purement spéculatives et souvent erronées.

On peut utiliser une chambre ordinaire; on la monte sur une planchette à rainures qui permet de la déplacer d'une quantité connue, en maintenant le parallélisme des deux positions de l'axe de l'objectif.

On réalise un téléstéréoscope en donnant une grandeur notable au déplacement constituant la base.

89. Montage des épreuves stéréoscopiques.

1° — On emploie généralement ici des locutions absurdes dont voici le type : *il faut mettre à droite la vue prise à gauche, et réciproquement.*

Il n'est cependant pas douteux que l'œil gauche doit regarder l'épreuve prise par l'objectif gauche, et inversement. Qu'on place devant les yeux D, G (fig. 79) un petit cube sur une face latérale duquel est écrite la lettre A. Il est clair que l'œil (ou l'objectif) droit peut voir la lettre, ce qui est impossible à l'œil (ou à l'objectif) gauche.

Cherchons d'où viennent ces indications stupides qu'on trouve partout.

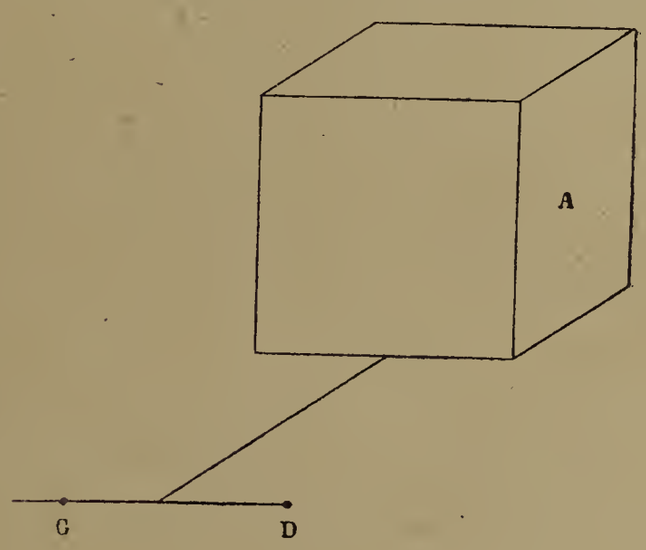


Fig. 79.

Le lecteur se reportera au § 280 pour la définition précise des mots *renverser* et *retourner*.

La figure 80 montre les deux objectifs; ils donnent de l'objet O (schématiquement représenté à droite) deux images renversées.

La figure DG à droite est ce qu'on obtient sur le positif (diapositif ou papier), après le double retournement habituel (dû à ce qu'on impressionne la plaque sensible gélatine en avant, et qu'on obtient le positif avec la gélatine du négatif appliquée contre la gélatine du cliché devant servir de diapositif). Les images DG sont renversées.

Les perspectives dont on a besoin, seraient en *d* et en *g* qui ne diffèrent de D et de G que par un simple redressement. Pour redresser il suffirait de faire tourner chaque image D ou G *indépendamment l'une de l'autre* de 180° autour d'un axe normal à leur plan. Mais comme elles sont obtenues sur le même cliché, cette opération est impossible, à

moins qu'on ne coupe préalablement l'épreuve sur papier ou qu'on ne divise le diapositif d'un trait de diamant.

Tout cela est très simple.

Mais supposez avoir entre les mains l'épreuve DG; *elle est tête en bas.* Il vous paraît naturel d'en redresser simultanément les deux parties par une rotation de 180° autour d'un axe normal à son plan.

Mais vous ne prenez pas alors garde que *simultanément vous faites passer à gauche l'épreuve qui résulte de l'objectif droit, et inversement.*

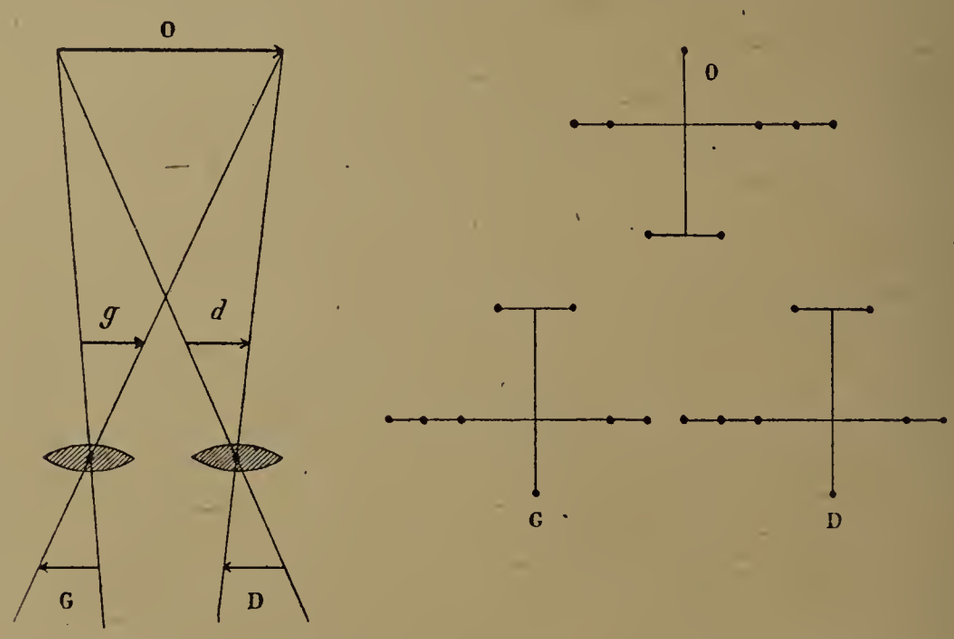


Fig. 80.

Pour rétablir les choses convenablement, vous êtes alors conduit à intervertir les images : d'où la formule absurde citée plus haut.

En réalité cette interversion n'est que l'annulation d'une interversion antérieure provenant de ce qu'on a l'habitude de raisonner après avoir redressé l'épreuve.

2° — En définitive la seule opération à effectuer est le redressement des épreuves droite et gauche *indépendamment l'une de l'autre.* On obtient ce résultat par le redressement en bloc de deux épreuves et leur interversion : opération complexe qui en définitive laisse à droite ce qui était à droite et à gauche ce qui était à gauche.

Il revient au même d'opérer sur le négatif ou sur le positif. Quand on doit faire un grand nombre de positifs, on prépare le négatif. On le coupe par le milieu, puis on transpose les morceaux qu'on recolle sur une glace de manière que la gélatine se trouve extérieurement. Avec du papier noir on délimite exactement les parties qu'il faut conserver. On a le soin dans le recollage de mettre les points homologues à environ 7 centimètres l'un de l'autre, ce qui exige généralement un rognage supplémentaire du négatif.

3° — Chassis transposeur.

Pour éviter de coller sur une glace auxiliaire les morceaux du cliché,

on utilise un châssis *transposeur*. Il est fait en somme comme le châssis que représente la figure 237, à cela près qu'on a collé contre la glace une feuille mince d'ébonite ou de carton, entaillée de manière à recevoir les deux morceaux du négatif et à empêcher leurs déplacements relatifs. Il est facile de construire soi-même ce guide pour le format de l'appareil dont on se sert.

90. Stéréoscopes utilisés pour l'observation des épreuves photographiques.

On délaisse généralement aujourd'hui le stéréoscope à prismes ou à lentilles décentrées de Brewster. L'appareil vendu par la majorité des constructeurs se compose simplement de deux lentilles de 12 à 15 centimètres de distance focale, qu'on peut écarter plus ou moins de l'épreuve pour mettre au point, et qui parfois sont montées de manière à permettre de modifier la distance de leurs axes optiques suivant l'écartement des pupilles.

Helmholtz ajoute une seconde paire de lentilles (fig. 81) qu'on supprime ou qu'on maintient suivant qu'on veut un petit ou un fort grossissement.

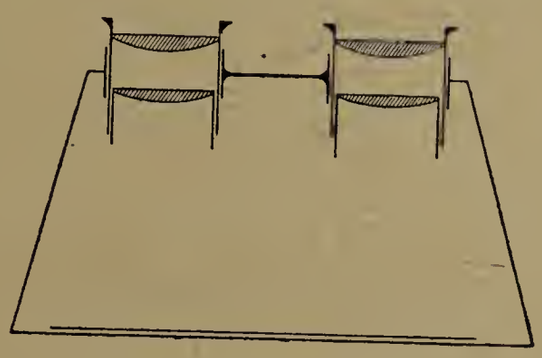


Fig. 81.

L'œil emmétrope ou hypermétrope a intérêt à placer le dessin dans le plan focal principal des lentilles. Si l'observateur est myope, il se ramène au cas précédent en conservant le binocle dont il se sert pour voir au loin. Les lignes visuelles sont alors naturellement parallèles, puisqu'on observe un objet à l'infini : les prismes ou les lentilles décentrées deviennent inutiles (§ 83).

Les yeux ne jugeant pas de la distance absolue, on ne trouve que des avantages à envoyer l'image au loin; en particulier la distance des yeux à l'appareil n'intervient plus sur l'effet produit.

91. Téléstéréoscopes.

1° — La méthode consiste à réaliser sur un verre dépoli V et à l'aide de deux objectifs L_1, L_2, très écartés, sur une horizontale, deux images stéréoscopiques qu'on regarde avec deux oculaires O_1, O_2. Réglons les moitiés de l'appareil de manière qu'à la vision binoculaire, les images des objets très éloignés se superposent exactement. Les images des objets plus rapprochés ne se superposent pas.

Prenons un point A à la distance δ de l'appareil; marquons d'un signe les positions de ses images sur le verre dépoli. Opérons de même pour une série de distances δ. A la vision binoculaire, nous avons des repères qui semblent planer dans l'atmosphère à des distances δ différentes. Pour estimer la distance d'un objet A, nous cherchons de quel

repère il semble le plus rapproché. En orientant convenablement l'appareil, nous amenons l'image de l'objet A près de ce repère, ce qui facilite les comparaisons.

2° — On peut réaliser l'expérience d'une autre manière.

Deux aiguilles verticales sont déplacées horizontalement par une vis micrométrique à pas inverses, de manière que leurs pointes se rapprochent ou s'éloignent. Elles se meuvent tout près du plan V, en arrière de ce plan, de manière qu'on en distingue sur le plan V les ombres

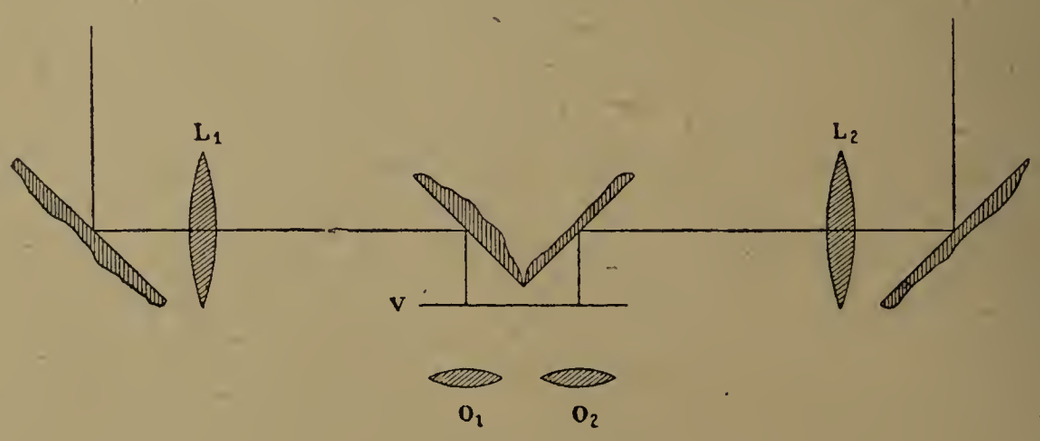


Fig. 82.

portées. Quand on modifie leur écartement, on modifie la distance apparente de leur point de fusion; successivement il paraît se trouver dans les divers plans de front du paysage.

On conçoit que la vis micrométrique puisse être étalonnée en distances δ.

92. Emploi du stéréoscope pour comparer deux objets presque identiques.

Voici d'intéressantes expériences, déjà anciennes, dont l'explication est immédiate (Dove).

On regarde au stéréoscope de Brewster deux médailles dont on superpose aussi exactement que possible les images. Elles sont obtenues avec le même coin mais avec des métaux différents. N'étant pas identiques à cause de l'inégalité des compressibilités, par suite des dilatations inégales après le coup de balancier), elles donnent une image fusionnée légèrement bombée. Des différences qui seraient autrement inappréciables, apparaissent.

De même fusionnons à l'aide du stéréoscope des objets plans qui devraient être identiques (billets de banque, photographies du ciel à la même échelle,...). Pour peu qu'il existe *une différence*, elle se traduit par un relief; elle apparaît *dans l'espace*, en deçà ou au delà du plan général de l'objet. Par exemple, en comparant un billet de banque faux à un billet vrai, certaines lettres ont l'air de reculer ou d'avancer par rapport à l'ensemble du texte. Une planète se distingue immédiatement des

étoiles fixes : n'étant pas à la même place dans les deux clichés par rapport aux étoiles environnantes, la planète apparaît en avant ou en arrière de la voûte céleste.

Dans ces dernières années on a systématisé ce procédé connu depuis quatre-vingts ans; on a construit des appareils spéciaux pour l'appliquer : cela n'ajoute rien au principe.

CHAPITRE VI

ILLUSIONS VISUELLES

93. Nature des illusions visuelles. Exercice normal et anormal de l'œil.

1° — Nous sommes arrivés à la conclusion suivante : *les sensations visuelles sont des signes que nous apprenons à déchiffrer.* Si notre éducation est bien faite, nous créons donc entre nos sensations et les objets extérieurs des associations qui nous permettent de juger de l'existence, de la forme, de la couleur et de la distance de ces objets, dans les conditions ordinaires d'exercice de l'organe.

Inversement nous affirmons l'existence dans le champ visuel, des objets qui devraient s'y trouver effectivement pour donner nos sensations actuelles, *lors de l'exercice normal et ordinaire de l'œil*; cela, que l'existence des objets soit réelle ou non.

D'où deux catégories d'illusions visuelles.

2° — Nos sens, en particulier notre vue, peuvent être soumis à l'action de causes insolites ; c'est le cas des images catoptriques ou dioptriques.

On ne peut pas dire que la vue nous trompe quand elle nous montre un bâton brisé par la réfraction, ou quand l'œil se trouve incapable de décider parmi les objets en nombre infini qui ont même perspective. L'image sur la rétine est celle d'un bâton brisé, les images de tous les objets sont identiques : l'interprétation que nous devons donner, est la plus ordinaire, celle qui est imposée par les expériences antérieures.

L'illusion, dit le langage vulgaire, est une erreur des sens qui fait prendre l'apparence pour la réalité. Cette définition est fausse. L'illusion n'est pas une erreur des sens : c'est une erreur d'interprétation des sensations, c'est une erreur de la perception. Les sens fonctionnent normalement : mais nous « réalisons » leurs renseignements d'une manière qui, *correcte d'habitude*, est faussée par quelque circonstance exceptionnelle.

3° — Dans les exemples précédents, il y a exercice normal.

Passons à l'exercice anormal de nos sens.

Nous nous sommes entraînés par habitude à considérer une sensation

comme le résultat de l'existence d'objets extérieurs. Conséquemment toute sensation visuelle est projetée hors de nous et crée une réalité, *alors même que les excitations sont purement locales* : un coup de poing sur l'œil devient trente-six chandelles.

Tout le monde sait qu'en croisant deux doigts et en les faisant rouler sur une bille, on a la sensation de deux billes ; en effet dans leurs positions relatives habituelles, le bord externe du troisième doigt et le bord interne du second, par exemple, ne peuvent être touchés simultanément par une seule bille. Si nous croisons les doigts et les faisons rouler sur une bille, les sensations tactiles qui ne sont pas modifiées, sont interprétées de travers.

Si pour une raison quelconque l'exercice de l'œil n'est plus normal, la loi de correspondance est faussée.

Par exemple, nous disons que les objets sont jaunes quand les intensités des radiations qu'ils émettent sont dans certains rapports : voilà l'usage normal de l'œil. Si nous avons la jaunisse, ou si des injections spéciales modifient la sensibilité de l'œil pour certaines radiations, nous nous trompons sur la couleur : nous avons faussé un des termes de la correspondance établie par l'expérience dans l'état normal.

94. Circonstances qui facilitent les illusions d'optique.

1° — Suppression d'une partie des sensations.

Les sens sont très imparfaits. Pour ne rappeler qu'un exemple, presque toujours presque tous les objets sont vus doubles. Comme ces imperfections sont gênantes, *nous les supprimons* ; nous nous habituons à ne pas les percevoir, au point qu'il nous est très difficile ensuite d'en reprendre conscience.

Par exemple, les strabiques suppriment purement et simplement ce que voit un de leurs yeux ; cet œil reçoit des sensations normales, mais leur perception est abolie.

Si ces propriétés des sens, *dont nous ne voulons pas ordinairement reconnaître l'existence*, s'imposent d'une façon particulière à notre attention, nous les interprétons d'une manière erronée.

2° — Réunion des sensations en groupes.

Comme nous n'interprétons les sensations que pour l'utilité, nous les groupons de manière qu'elles deviennent le signe d'un objet. Nous nous refusons à séparer des éléments qui par nature sont pourtant essentiellement distincts.

Par exemple, quand nous entendons simultanément les sons d'un violon et d'un violoncelle, bien que chacun d'eux soit composé d'un fondamental et de partiels, qu'il s'y ajoute des raclements caractéristiques, bien que l'oreille soit capable d'analyser la vibration complexe, nous faisons, d'une part des sons du violon, de l'autre de ceux du violoncelle, deux ensembles que nous entendons comme tels. Nous prenons de ces groupements une telle habitude qu'il nous est ensuite

extrêmement difficile, sans l'aide de résonateurs, d'analyser les éléments constitutifs d'un son complexe.

Les mouvements d'un homme nous semblent naturels : regardons-les dans une glace qui les renverse : ils deviendront bizarres. Ils ne présentent plus leur aspect accoutumé, celui que nous avions enregistré par utilité.

Nous avons ainsi constitué des groupes de sensations que souvent nous sommes incapables d'analyser. Un tel a pour nous l'allure d'un porteur d'eau, tandis qu'à sa démarche on reconnaît une déesse : qu'on cherche à définir ce qu'il faut entendre par allure d'un porteur d'eau ou démarche d'une déesse! Cependant, pour des hommes de même éducation, ces locutions correspondent à des représentations analogues.

Le besoin de dissocier certains groupes de sensations pour en mieux juger les éléments, explique la coutume des peintres de regarder leur toile dans une glace qui la renverse. Les objets devenant méconnaissables, ils reconnaissent plus facilement si les couleurs s'harmonisent.

3° — Influence du souvenir ou d'une idée préconçue.

Un serpent n'est pas *froid*; pourtant l'épithète subsiste. On s'attend à trouver chaud tout corps vivant : quand il n'a que la température du milieu ambiant, il paraît froid. Le bout de bois voisin, exactement à la même température, paraît chaud.

Dans les mêmes conditions, la barre de fer semble froide. C'est qu'elle est conductrice : comme elle ne s'échauffe pas au contact de la main, comme sa température subsiste, nous la déclarons froide.

Dans ces exemples la sensation est correcte. Mais son interprétation est faussée par une attente qui est déçue; la perception est influencée par un terme de comparaison inexact.

Les sensations douteuses deviennent des perceptions formelles sous l'influence d'une idée préconçue. C'est ainsi que de braves gogos, qui s'intitulent savants et parfois sont remarquables dans une étroite spécialité, sont bernés par des spirites qui leur montrent... ce qu'ils leur ont suggéré de voir. C'est ainsi que les prestidigitateurs ou les joueurs de bonneteau nous font prendre des vessies pour des lanternes : nous ne voyons pas ce qui nous crève les yeux, parce qu'ils nous persuadent de voir autre chose.

Il est nécessaire que nous interprétions les sensations toujours de la manière que l'habitude montre le plus utile, manière que nous pouvons appeler *correcte* ou *normale*. Il est donc nécessaire que nous soyons trompés quand, pour des raisons particulières, il faut interpréter la sensation d'une manière différente.

Quand un cas jamais auparavant rencontré se présente, il est inévitable que nous lui appliquions notre expérience antérieure; elle peut nous induire en erreur.

95. **Phénomènes entoptiques.**

On appelle *phénomènes entoptiques* les ombres qui se projettent sur la rétine pour certains modes d'éclairage. La manière la plus simple de les voir consiste à prendre pour source lumineuse un petit trou T fortement éclairé et placé sensiblement au foyer antérieur de l'œil. Dans le corps vitré, il en résulte un faisceau de rayons parallèles.

1° — Mouches volantes.

Ce sont de petits corps opaques qui se trouvent dans le corps vitré et portent ombre sur la rétine. Nous les *réalisons* extérieurement : d'où leur nom de *mouches volantes*. Un peu de réflexion nous amène bien vite à trouver la cause du phénomène. Mais dans la fièvre et les affec-

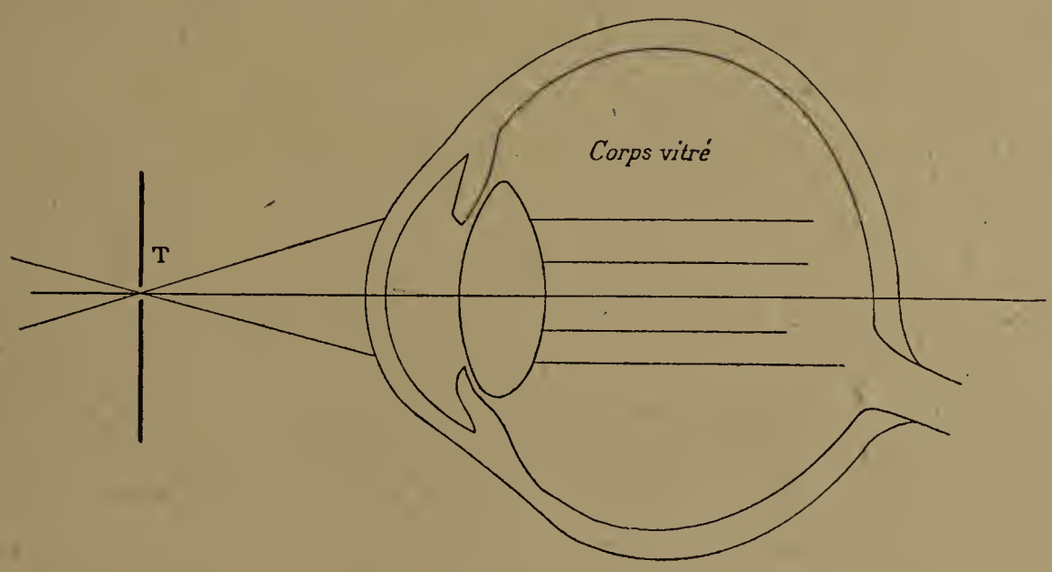


Fig. 83.

tions cérébrales, ils se transforment en véritables hallucinations. Le malade atteint de délire alcoolique voit courir des rats et s'épouvante.

Si les corpuscules sont très voisins de la rétine, l'éclairage spécial est inutile. Naturellement quand les corpuscules descendent, on les voit monter, puisqu'on les projette extérieurement sur une droite allant de l'ombre au centre optique de l'œil.

2° — Le cercle éclairé est limité par l'ombre du bord de l'iris; nous projetons donc extérieurement les irrégularités de ce bord. Quand nous fermons l'autre œil, nous vérifions que la pupille de l'œil qui reste ouvert, se dilate légèrement *par sympathie* : le rayon du cercle éclairé croît. Il décroît quand nous éclairons vivement l'autre œil.

3° — Tout ce qui salit la cornée, la mouille ou la graisse amène des irrégularités de réfraction, par suite des inégalités d'éclairement. L'intersection de la caustique par la rétine est le lieu des points où la lumière s'accumule. Ce lieu forme suivant les cas des stries, des points,... que nous projetons extérieurement.

96. **Grandeur et distance des objets.**

1° — La vision monoculaire ne renseigne pratiquement pas sur la dis-

tance. Théoriquement la sensation du degré d'accommodation permet une estimation de la distance : l'expérience montre qu'elle est très vague, même pour les yeux exercés et dans les conditions les meilleures.

La vision monoculaire ne fournit donc que la direction et la distance angulaire de deux points (angle apparent). Suivant la distance à l'œil de l'endroit où nous les localisons, ils nous paraissent proches ou éloignés l'un de l'autre. Inversement suivant la distance que nous supposons entre eux, ils nous paraissent proches ou éloignés de nos yeux.

Voici une expérience démonstrative.

Regardons une bougie en tenant un prisme d'une dizaine de degrés devant la moitié de la pupille : nous avons deux images. Rapprochons

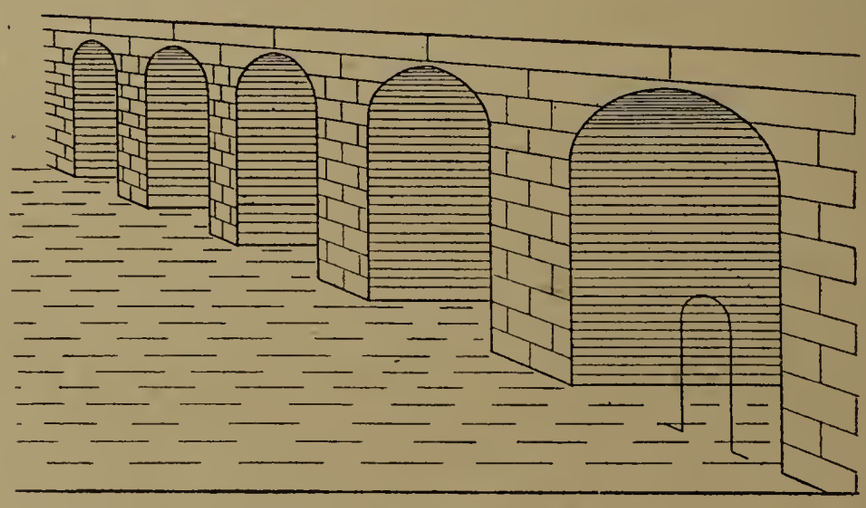


Fig. 84.

ou éloignons la bougie : les deux images nous paraissent se rapprocher ou s'éloigner l'une de l'autre, bien que leur distance sur la rétine reste invariable. Mais ces images devenant plus petites quand nous éloignons la bougie, nous avons conscience de cet éloignement : l'angle apparent restant le même, nous considérons les images comme plus éloignées l'une de l'autre.

2° — Quand rien ne nous aide, nous faisons sur les distances des erreurs extraordinaires; par exemple, sur l'appréciation de la longueur d'un tunnel dans lequel nous sommes et dont nous voyons la sortie.

Les erreurs d'estimation de la grandeur relative d'objets même voisins, sont parfois singulières.

La nécessité d'interpréter fait que dans un dessin nous jugeons fort mal des dimensions réelles. La figure 84 représente une série d'arches régulières; par rapport à la première, la dernière nous paraît plus grande qu'elle n'est. Nous la grandissons instinctivement parce que nous savons qu'elle *représente* une arche *égale* à la première. Elle est reportée en vraie grandeur dans celle-ci pour qu'on puisse juger de ses dimensions réelles.

On met un pain à cacheter au foyer d'une loupe. L'image est à l'infini; l'angle sous lequel elle est vue, ne dépend pas de la distance de l'œil à

la loupe. Cependant sa grandeur apparente croît à mesure que l'observateur s'éloigne. Cela tient à ce que l'image couvre une portion de plus en plus grande de la lentille et (voici le jugement erroné) que nous la localisons non pas à l'infini, mais immédiatement derrière celle-ci.

97. Grandeur de la Lune à l'horizon.

Analogue se présente le fameux problème de la grandeur de la Lune à l'horizon. Elle y paraît incomparablement plus grande qu'au zénith. C'est dire que nous l'y croyons beaucoup plus éloignée; c'est encore dire que nous imposons à la voûte céleste non pas la forme sphérique, mais celle d'une coupe aplatie. Le problème est donc de savoir pourquoi nous ne considérons pas le ciel comme sphérique : il est loin d'être résolu.

C'est un fait qu'instinctivement nous nous représentons le ciel

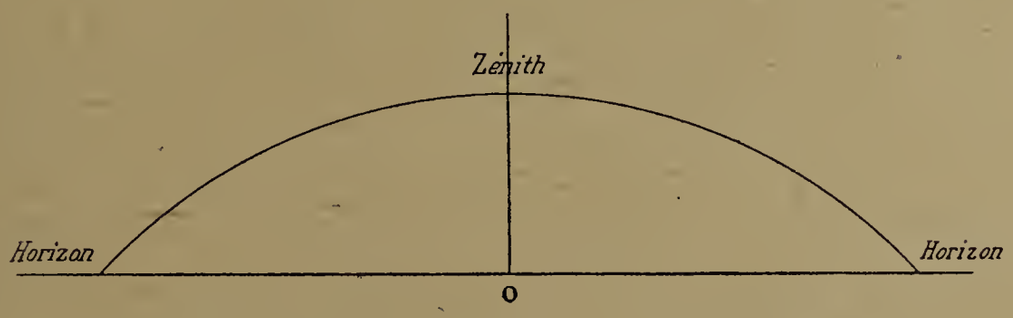


Fig. 85.

comme une coupole *posée* sur la Terre (fig. 85) : « Tous les hommes, dit Euler, les savants aussi bien que les idiots, sont également dupes sur cet article-là ».

Nous pouvons attribuer cette illusion à l'habitude d'être dans des salles dont nous sommes toujours tentés de sous-estimer la hauteur:

On a prétendu que les objets à l'horizon nous semblent plus gros qu'au zénith parce qu'entre eux et nous apparaissent beaucoup d'autres objets. Cela peut être, bien qu'Euler soutienne que la Lune paraît toujours plus grosse à l'horizon, même regardée dans un tube cachant les objets terrestres.

Helmholtz trouve que la lune à l'horizon reprend ses dimensions coutumières quand on la regarde par réflexion sur une glace sans tain, alors même qu'on ne cesse pas de voir les corps environnants.

Au surplus l'effet n'est surprenant par sa grandeur que si l'air est brumeux et l'éclat de l'astre diminué : serait-ce en raison de la perspective aérienne?

Bravais signale une singulière illusion analogue à la précédente.

On dessine une côte présentant de grandes inégalités de terrain, vue d'un navire situé à une distance assez grande. L'expérience prouve qu'on figure les distances verticales à une échelle plus grande (sensiblement double) que les distances horizontales.

98. Illusion binoculaire sur la distance. Estimation de la distance absolue.

1° — On regarde une toile métallique G placée dans un plan de front. Les yeux sont en O_1 et O_2 (fig. 86). Les mailles ont par exemple un côté ε de 4 millimètres; la distance d des yeux à la toile est 30 centimètres; la distance e des centres des pupilles est 64 millimètres.

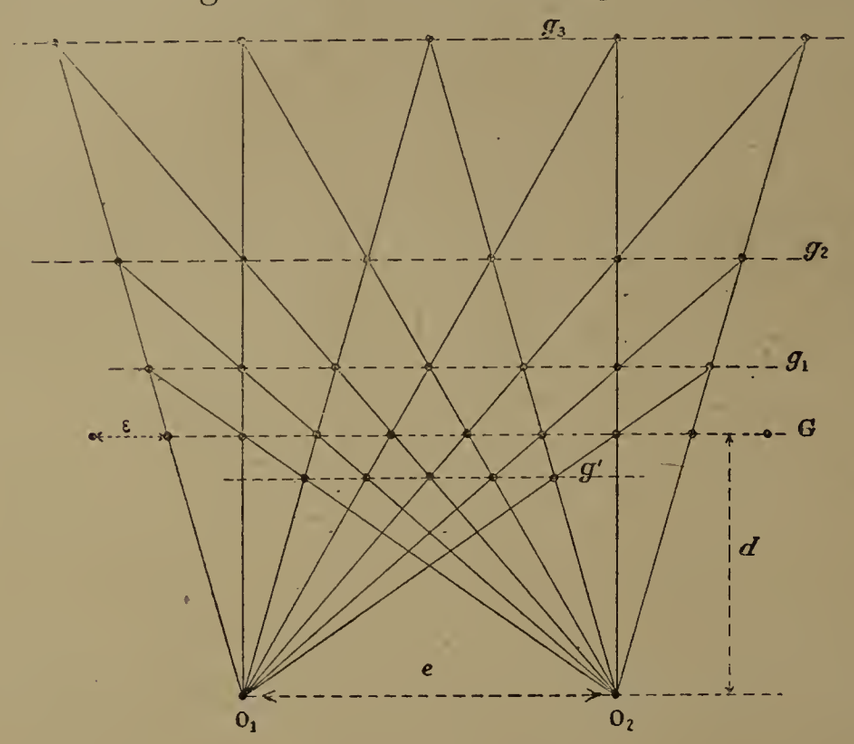


Fig. 86.

L'expérience montre qu'on peut se faire illusion sur la distance et voir la toile dans un des plans g_1, g_2, g_3, ..., g', g'', ..., où se coupent les rayons visuels allant des yeux aux fils.

L'explication est immédiate : au lieu de fusionner les images du même fil ($n = o$), nous fusionnons les images de fils qui se trouvent à la distance $n\varepsilon$ les uns des autres.

Exprimons la distance x d'un plan g quelconque au plan G. On a :

$$x = \frac{n\varepsilon d}{e - n\varepsilon}.$$

Avec les données ci-dessus choisies et pour les plans au delà de la toile ($x > 0$), on a :

$$e : \varepsilon = 16, \qquad d = 30^{\text{cm}}, \qquad x = \frac{30n}{16 - n} \text{ centimètres.}$$

$$x = 0 \quad 2{,}0 \quad 4{,}3 \quad 7{,}0 \quad 10{,}0 \quad \text{etc.} \quad \ldots \quad \infty.$$

En faisant n négatif, on obtient la série des plans compris entre la toile et l'œil :

$$-x = 0 \quad 1{,}8 \quad 3{,}3 \quad 4{,}7 \quad 6{,}0 \quad \text{etc.} \quad \ldots \quad 30.$$

Quand la toile paraît plus loin qu'elle n'est, en approchant un doigt, on la touche alors qu'elle paraît encore en arrière du doigt. On passe du reste d'un plan g à un autre brusquement et sans qu'on sache généralement pourquoi. On peut réaliser l'une des illusions à coup sûr en plaçant un objet dans le plan g où l'on veut voir la toile; il détermine la convergence et l'accommodation simultanément nécessaires.

S'il existe une marque particulière dans un des carrés de la toile,

l'illusion reste possible mais la marque est dédoublée; ce qui était à prévoir en vertu du § 79.

L'expérience réussit avec tout système périodique de dessins, par exemple avec les papiers peints dont la période est assez petite pour rendre la fusion facile; la tenture semble planer à quelque distance du mur qui la porte.

99. **Mouvements relatifs.**

1° — Nous ne pouvons connaître que les mouvements relatifs : par exemple, nous n'avons pas conscience d'être entraînés par la Terre avec une vitesse pourtant formidable.

D'où l'illusion bien connue des trains en marche relative : on croit être parti quand s'ébranle le train qui stationne à côté.

Le jugement est déterminé par des principes divers. Parfois on considère comme immobile la partie la plus grande du champ visuel, comme mobile la plus petite. Parfois interviennent les circonstances accessoires : chocs qui accompagnent le départ, effet de l'inertie sur le corps,....

2° — Quand on a longuement regardé à la portière d'un train ou contemplé une chute d'eau, on est affecté d'une sorte de vertige visuel qui fait voir les corps immobiles par rapport à nous, animés d'un mouvement de sens inverse de celui qu'avaient précédemment les objets mobiles contemplés.

Quand le train s'arrête, le paysage paraît fuir en avant du train; l'eau quasi immobile de la rivière au-dessus ou au-dessous de la chute paraît remonter vers sa source.

L'explication du phénomène est dans les petits mouvements involontaires, le plus souvent inconscients qu'on impose à l'œil pour suivre les corps en mouvement.

Quand par suite de l'arrêt du train, ces mouvements deviennent inutiles, nous attribuons le fait au déplacement des corps en sens contraire. Pour que le vertige se produise après l'arrêt du train, il faut que ces petits mouvements existent et qu'on n'en ait pas pleine conscience; pendant que le train marche, on empêche donc le vertige de se préparer en fixant un point immobile relativement à nous (un point de la glace devant laquelle se déroule le paysage) ou en réalisant des mouvements volontaires étendus.

3° — Antirhéoscopes.

On a construit des appareils pour provoquer à volonté le phénomène précédent.

Le plus simple est une très large courroie sans fin de toile; elle passe sur deux poulies plates auxquelles on impose une vitesse angulaire variable à volonté. Sur la courroie on trace de gros traits noirs perpendiculaires à sa grande dimension. Si la vitesse n'est pas trop grande, l'œil cherche à les suivre : d'où petits mouvements involontaires et

inconscients, et production du phénomène quand l'observateur regarde ensuite des objets immobiles.

L'appareil d'Oppel est plus compliqué.

Il se compose de six rouleaux de bois verticaux *a b c c b a*, placés les uns à côté des autres dans le même plan, recouvèrts d'un papier blanc sur lequel on trace quelques spires d'une hélice.

Lorsque les rouleaux tournent, les parties visibles des hélices montent ou descendent. Coaxialement aux rouleaux sont fixées des poulies qu'on entraîne avec une corde sans fin par un procédé quelconque. En prenant les rayons des poulies *b* plus petits que ceux des poulies *a*, les rayons des poulies *c* plus petits que ceux des poulies *b*, on imite l'écoulement inégal d'une cascade plus rapide du centre qu'aux bords.

L'expérience montre que le vertige disparaît quand on fixe un point placé en avant de la toile ou des rouleaux. Il y a naturellement une vitesse optima : si la vitesse est très petite, nous suivons aisément les repères; si elle est trop grande, les repères disparaissent en raison de la persistance des impressions lumineuses.

100. Erreurs d'estimation sur la position de la tête. — Quand on incline la tête d'un angle α *à droite ou à gauche*, en maintenant les yeux fixes dans les orbites, l'image d'une ligne (horizontale par exemple) tourne sur la rétine de l'angle α. Pour qu'elle paraisse immobile, il faut évaluer correctement l'inclinaison de la tête. L'expérience montre que nous avons une tendance à la surestimer, lorsqu'elle se produit dans l'obscurité, c'est-à-dire quand manquent nos repères habituels.

Pour faire l'expérience, on pratique dans le volet d'une chambre noire une fente de quelques centimètres de longueur.

Inclinons la tête de 45°, dextrorsum pour préciser; l'image sur la rétine tourne de 45° en sens inverse. Si *nous estimons* avoir incliné la tête de 90°, la fente dont l'image n'a tourné que de 45, semble avoir tourné dans son plan de 45° sinistrorsum. Les erreurs d'estimation peuvent être de cet ordre.

101. Estimations incorrectes des grandeurs.

Un grand nombre d'illusions découlent de ce principe formulé par Helmholtz : *un objet paraît d'autant plus grand qu'on peut plus aisément en distinguer les parties, par conséquent qu'il est effectivement divisé.*

Ainsi on est tenté de poser $\overline{ab} = \overline{bc}$ (fig. 87) tandis qu'en réalité $\overline{ab} > \overline{bc}$. Nous sommes trompés par les divisions tracées sur *bc*.

La figure A paraît plus haute que large; la figure B paraît plus large que haute : ce sont pourtant des carrés parfaits.

L'angle C paraît plus petit que D.

Une chambre vide paraît plus petite qu'une chambre meublée; un mur tapissé paraît plus grand qu'un mur nu. Tout le monde connaît

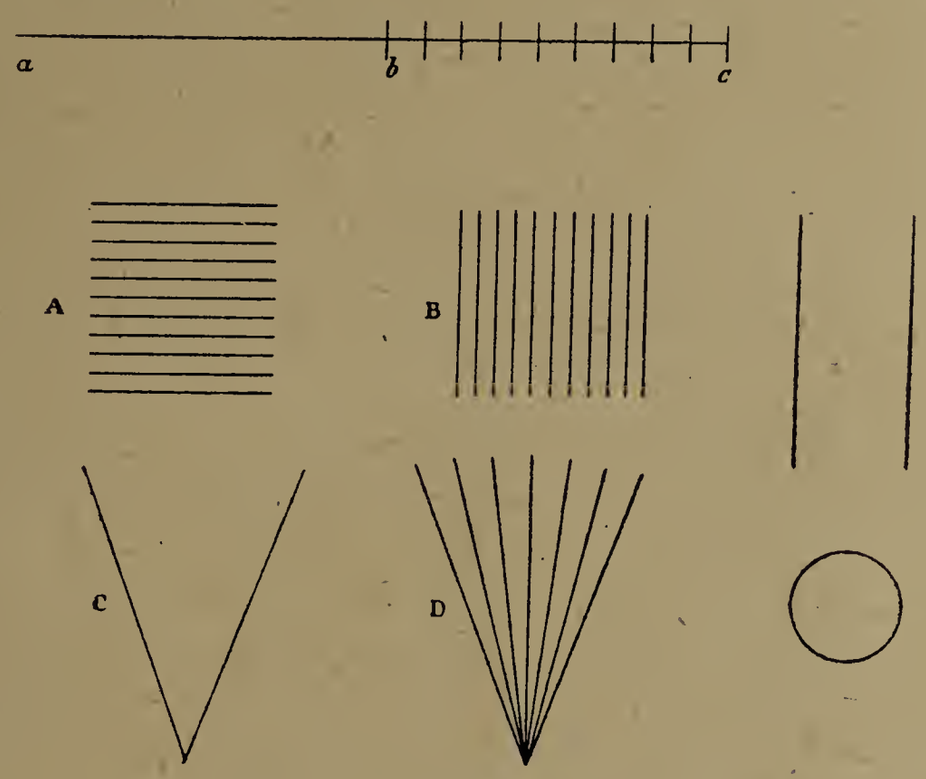


Fig. 87.

l'erreur par excès de l'estimation de la hauteur des chapeaux haut de forme comparée à la hauteur de la plinthe d'un mur.

On surestime ordinairement le diamètre des cylindres.

Par exemple plaçons une bouteille sur du papier, traçons la circonférence; on est étonné de sa petitesse.

102. Erreurs d'estimation des angles.

Une infinité d'illusions s'expliquent au moyen des principes suivants.

a) Les côtés d'un angle sont déviés vers l'intérieur de cet angle; ce qui revient au même, il tend à paraître plus petit qu'il n'est.

b) La déviation croît avec la grandeur de l'angle.

c) Par suite quand des angles aigus sont combinés avec des angles obtus, les aigus augmentent au détriment des obtus.

Fig. 88.

Appliquons ces principes.

1° — Dans la figure 88, l'horizontale de gauche semble passer au-

dessous de l'horizontale de droite; celle-ci semble passer au-dessus de

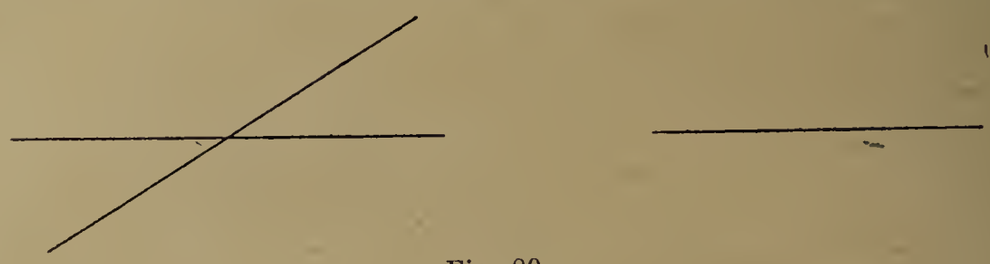


Fig. 89.

la première. Cela tient à ce qu'en vertu du principe *a* l'horizontale de

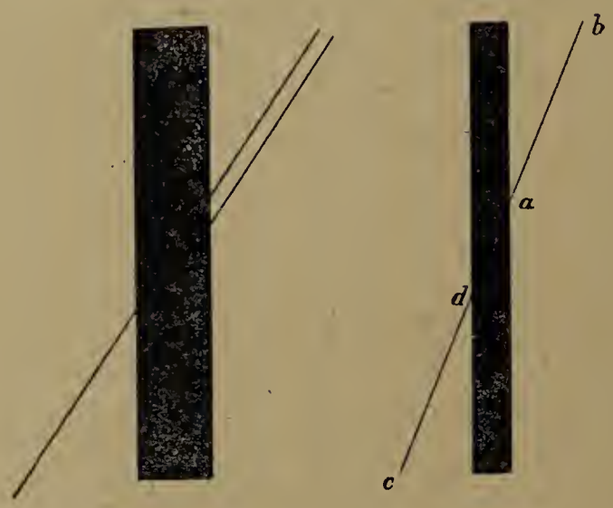


Fig. 90.

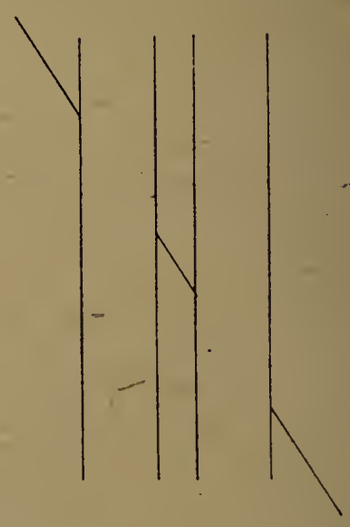


Fig. 91.

gauche pivote vers le haut autour du sommet de l'angle correspondant; l'horizontale de droite pivote vers le bas.

Les obliques prolongées semblent converger.

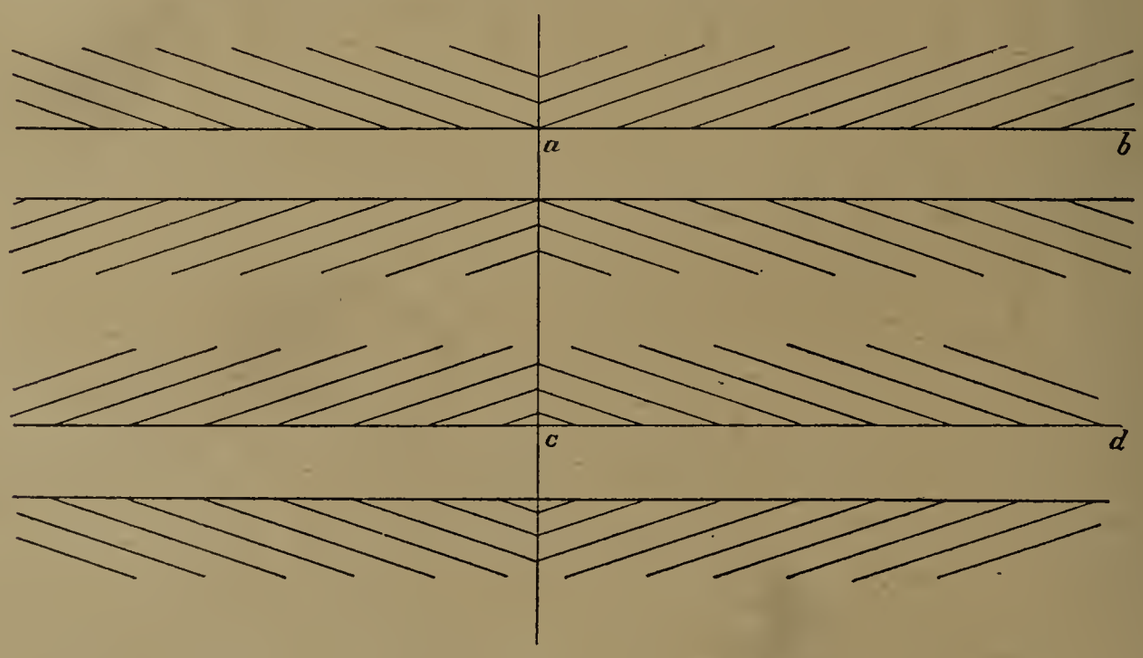


Fig. 92.

Dans la figure 89, l'horizontale de gauche semble passer sous celle de droite. C'est la conséquence du principe *c*.

2° — Dans la figure 91, les lignes *ab*, *cd*, ne semblent pas dans le prolongement l'une de l'autre; tout se passe comme si elles avaient

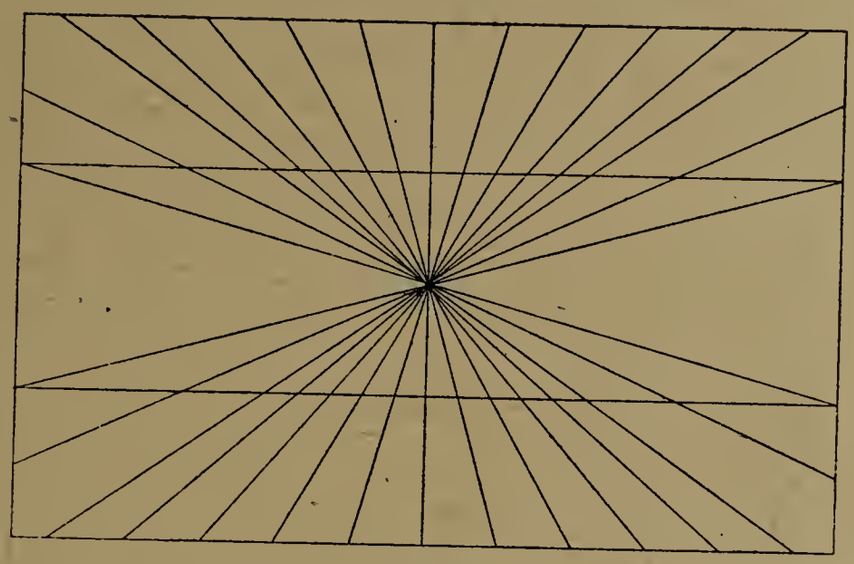


Fig. 93.

tourné autour des points *a* et *d*, de manière à augmenter les angles aigus.

De même la tendance à l'augmentation de ces angles provoque la rotation apparente de la ligne *ad* vers le bas autour du point *a* (fig. 92,

Fig. 94.

Fig. 95.

en haut), de la ligne *cd* vers le haut autour du point *c* (fig. 92, en bas).

Les quatre lignes horizontales de la figure 93 sont des droites parallèles : cependant les deux intérieures paraissent courbes et tournent leur concavité vers le centre.

3° — L'existence simultanée de deux droites qui se coupent, modifie non seulement la direction de chacune d'elles, mais encore leurs longueurs apparentes. C'est ce que montre la figure 95. L'œil ne voit pas de même longueur les quatre horizontales qui cependant sont égales.

La grandeur de l'illusion varie dans le même sens que la grandeur des angles.

Ces effets de contraste se manifestent dans la figure 96. Le trapèze du haut paraît plus large que celui du bas, parce que la grande base du premier est juxtaposée à la petite du second.

La figure 97 montre quels singuliers effets on obtient en coupant dissymétriquement cer-

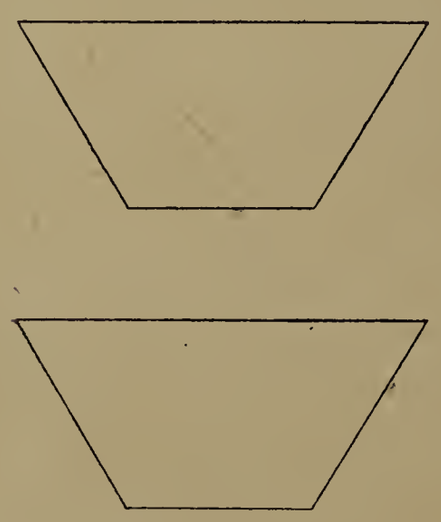


Fig. 96.

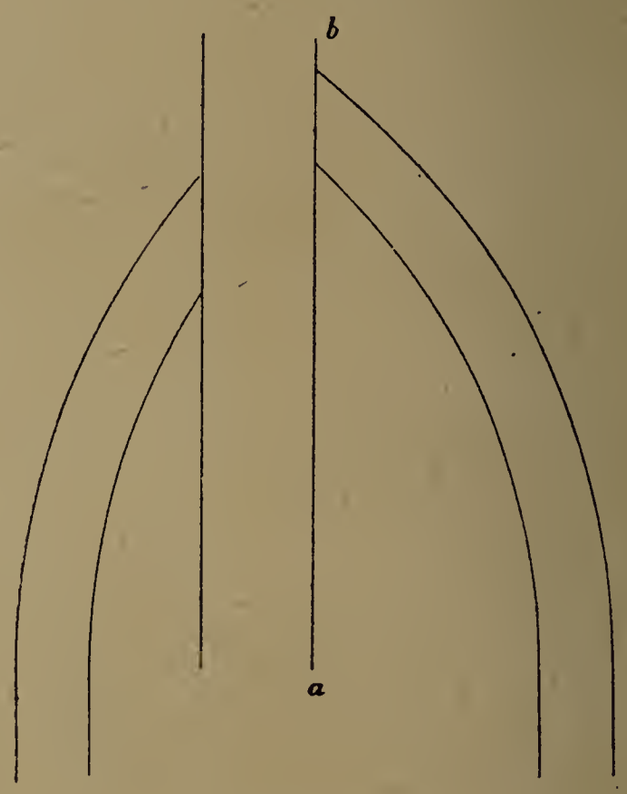


Fig. 97.

taines figures architecturales. Il est difficile de croire que les courbes se raccordent sur la ligne *ab* qui est de symétrie.

103. Renversement du relief.

L'ignorance de l'objet représenté donne lieu à des expériences curieuses de *renversement du relief*.

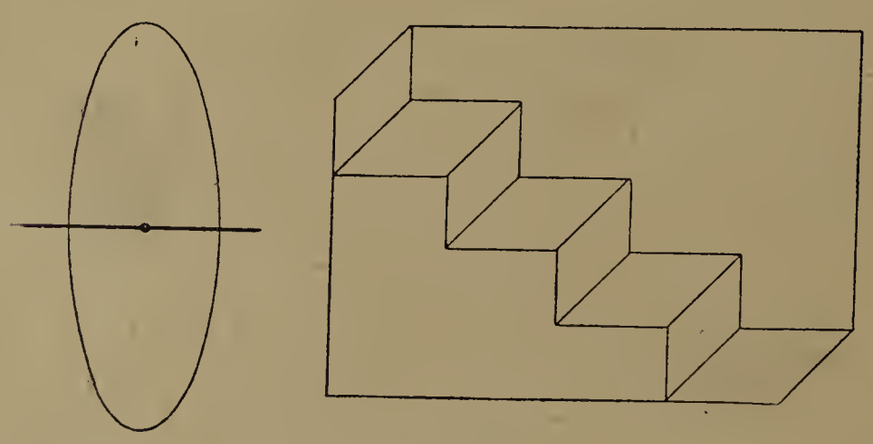


Fig. 98.

Dans la figure 98, on découvre un escalier dont les marches sont vues par-dessus, ou un pan de mur en surplomb qui se termine en forme de gradins dont les plans horizontaux sont vus par-dessous. C'est brusquement, d'ordinaire involontairement, qu'on passe d'un des aspects à l'autre, comme par un changement à vue au théâtre, après un battement de paupière par exemple.

Ces renversements sont fréquents non seulement pour des dessins,

mais aussi pour des objets (moules de médaille convenablement éclairés, par exemple).

Voici une observation que tout Parisien peut faire. En se promenant sur le quai de la Seine, en face Passy, il voit sur l'autre rive la Grande roue. Il lui est impossible de dire quelle face elle lui présente. Il ne supprime l'indétermination qu'en marchant : l'ellipse lui paraît alors s'aplatir ou s'élargir suivant qu'il s'approche ou s'éloigne du plan de la roue. Naturellement ne pouvant distinguer le point le plus rapproché du point le plus éloigné, il ne sait pas dans quel sens la roue tourne.

Un singulier exemple de renversement est fourni par les rayons solaires passant entre les nuages et diffusés par les poussières atmosphériques. Il va de soi que les rayons sont parallèles; les poussières éclairées sont plus voisines de nous à mesure qu'elles sont plus basses; l'aspect d'éventail est un effet évident de perspective, identique au rapprochement des rails à mesure qu'on regarde un point plus éloigné d'une voie rectiligne.

Cependant les rayons semblent diverger d'un point situé au-dessus des nuages et voisins de ceux-ci; ils forment un éventail dont les parties les plus basses, voisines du sol, semblent les plus éloignées du point radiant et aussi de l'observateur. L'illusion a pour cause l'aspect paradoxal qu'en raison de la perspective, prennent des parallèles très longues, aspect dont la photographie donne des exemples saisissants (§ 11).

VISION DES INTENSITÉS ET DES COULEURS

CHAPITRE I

PHOTOMÉTRIE (SOURCES DE MÊME TEINTE)

104. Hypothèse fondamentale.

Je ne reviendrai pas sur les considérations diverses que le lecteur trouvera dans mon Cours d'*Optique Géométrique*. Je rappelle seulement ce qui est indispensable pour comprendre les méthodes photométriques.

1° — A travers chaque élément superficiel d'une source sort, par unité de temps, une énergie qui constitue la lumière. Supposer que la source est plongée dans un milieu *parfaitement transparent*, revient à écrire que *cette énergie se conserve*. La quantité totale d'énergie émise pendant un certain temps mesure le *pouvoir émissif* de la surface considérée.

Pour faire le départ de ce qui est émis dans les diverses directions, on écrit que la quantité d'énergie (ou de lumière) Q qui sort dans un cône d'angle solide $d\omega$ (dont les génératrices ont une certaine direction moyenne) est de la forme :

$$dQ = I \,.\, d\omega. \qquad (1)$$

Cette formule ne suppose que la continuité de l'émission en fonction de la direction. Le pouvoir émissif est alors :

$$Q = \int\int I \,.\, d\omega;$$

l'intégrale porte sur la demi-sphère dans laquelle la surface émet; I est l'intensité de la source dans la direction moyenne du cône considéré.

Si la surface obéit à la loi de Lambert, I varie comme le cosinus de l'angle θ que la direction d'émission fait avec la normale à la surface.

Si l'angle solide est assez petit, et particulièrement s'il a pour axe la normale à la surface ($\cos\theta$ est alors voisin de 1), on peut écrire :

$$Q = I\omega. \qquad (2)$$

La formule (2) subsiste pour la source entière, pourvu que ses dimen-

sions soient petites par rapport à sa distance à la surface qui reçoit la lumière; Q est alors la quantité totale de lumière émise dans un cône d'angle ω dont le sommet est un point quelconque de la source et dont la direction moyenne des génératrices est donnée. En effet traçons une courbe sur la surface réceptrice : les droites qui la joignent à un point quelconque de la source forment respectivement des cônes d'angles solides presque égaux et de directions moyennes peu différentes.

Nous définissons ainsi une intensité *qui est une moyenne de quantités très inégales*; l'émission dans un cône donné se fait, pour les divers éléments, sous des angles très différents. Corrélativement, tandis que l'émission par un élément de surface varie d'un maximun suivant la normale à zéro suivant la tangente, l'intensité d'une source peut rester invariable quand on tourne autour d'elle : c'est ce qui arrive, par exemple, pour une bougie.

Pour mettre en évidence les dimensions de la source, on pose :

$$I = \sigma\varepsilon; \qquad (3)$$

ε est l'éclat intrinsèque, σ est l'aire de la surface qui émet.

On peut appliquer la formule (3) à la source entière; mais ε représente alors une moyenne.

Entre l'intensité et l'éclat intrinsèque existe la même relation qu'entre une masse et une densité superficielle.

2° — *L'éclairement* est le quotient Q : S de la quantité de lumière reçue, par l'aire de la surface qui la reçoit. En vertu de la définition de l'angle solide et à la condition que la surface S soit assez petite par rapport à sa distance r au sommet du cône, on a :

$$S \cos i = \omega r^2;$$

i est l'angle que fait le rayon moyen du cône avec la normale à la surface réceptrice S.

D'où : $$E = \frac{Q}{S} = \frac{\omega I}{S} = \frac{I}{r^2} \cos i.$$

3° — Le mot *éclairement* n'a pas ici son sens vulgaire. Une surface enduite de noir de fumée a beau recevoir de la lumière, le langage vulgaire ne la trouve pas éclairée. Ce que le vulgaire appelle *éclairement d'une surface*, c'est en réalité *son éclat intrinsèque*, c'est-à-dire la quantité de lumière qu'elle émet, pour une raison quelconque, dans une direction donnée, par unité de surface.

Mais pour les diffuseurs que nous emploierons, au moins quand on ne s'écarte pas trop d'une réception et d'une émission normales, l'éclat est proportionnel à la quantité *totale* de lumière reçue, c'est-à-dire à l'éclairement.

Il devient légitime de confondre dans le langage les deux notions si différentes d'éclairement d'une surface et d'éclat de cette surface, à la condition de nous arranger de manière que le coefficient de proportionnalité, généralement inconnu, demeure constant.

Il n'est pas impossible de mesurer l'éclairement d'une surface, c'est-à-dire la quantité totale d'énergie reçue, indépendamment des directions dans lesquelles elle est reçue : la pile thermoélectrique enduite de noir de fumée s'échauffe proportionnellement à cette quantité totale. Mais les méthodes photométriques dont nous allons parler, ne mesurent l'éclairement qu'en vertu d'une hypothèse, du reste vérifiée par l'expérience.

4° — Intensité d'un faisceau de rayons.

A tout instant on emploie la locution : *intensité d'un faisceau de rayons sensiblement parallèles.* Le mot *intensité* est ici pris dans un sens incorrect. Il équivaut à *éclairement par unité d'aire de la section droite.* On coupe le faisceau par un écran sensiblement normal; on détermine la quantité de lumière reçue par l'unité d'aire de cet écran. Si les rayons ne sont pas sensiblement parallèles, il est clair que l'*intensité* définie comme ci-dessous n'est pas constante : elle diminue quand on se déplace dans le sens où les rayons divergent.

105. Problème de la photométrie.

1° — *L'œil détermine avec une précision relativement grande* (de l'ordre du centième) l'*égalité des* éclats *de deux surfaces de grain identique, de même couleur, placées l'une à côté de l'autre.*

Toutes les méthodes photométriques se ramènent à cette égalisation.

En général nous ne déterminons l'égalité des *éclats* de deux surfaces que pour comparer les intensités de deux sources lumineuses S_1 et S_2. Elles produisent sur les surfaces des *éclairements*; nous admettons la proportionnalité entre l'éclairement et l'éclat : égaliser les éclairements se ramène à obtenir l'égalité des éclats.

De l'hypothèse de la conservation de l'énergie résulte une méthode fondamentale pour faire varier les éclairements.

Nous déplaçons les sources de manière que leurs intensités et leurs distances respectives aux surfaces éclairées satisfassent à la relation :

$$\frac{I_1}{r_1^2}\cos i_1 = \frac{I_2}{r_2^2}\cos i_2.$$

Pour être sûrs *a priori* que les éclairements et les éclats sont proportionnels, nous recevons les rayons sous le même angle *moyen* $i_1 = i_2$, et nous regardons les surfaces éclairées sous le même angle moyen.

Il est naturel de choisir l'incidence et l'émission quasi normales.

Nous étudierons d'abord les méthodes qui reposent sur la relation :

$$I_1 : r_1^2 = I_2 : r_2^2.$$

Nous supposons dans tout ce chapitre que les sources sont de même teinte; nous reviendrons au chapitre suivant sur les essais de comparaison des sources qui ne sont pas de même teinte.

Quand les sources sont de même teinte et tombent sur des écrans de même teinte, nous pouvons traiter la lumière comme si elle était homogène.

Il n'est pas nécessaire que les surfaces éclairées aient la teinte de la source; toutefois il semble préférable de les prendre blanches (couleur du talc, de la craie,....).

2° — Nous possédons d'autres méthodes pour modifier les éclairements. Les unes reposent sur des lois physiques : nous étudierons les plus simples, renvoyant au troisième volume la démonstration des lois utilisées.

Les autres reposent sur des lois physiologiques; nous renverrons leur étude aux chapitres ultérieurs.

3° — Puisqu'en définitive toutes les méthodes oculaires se ramènent à la comparaison des ÉCLATS de deux surfaces, elles peuvent servir à la comparaison des éclats des deux sources. Il suffit de projeter l'une à côté de l'autre les surfaces à comparer et d'égaliser leurs éclats par un procédé convenable. Nous verrons au § 113 une application de cette méthode.

Photomètres basés sur l'éclairement en raison inverse du carré de la distance.

106. Photomètres de Bouguer, de Ritchie.

1° — Le premier photomètre est dû à Bouguer et date de 1729.

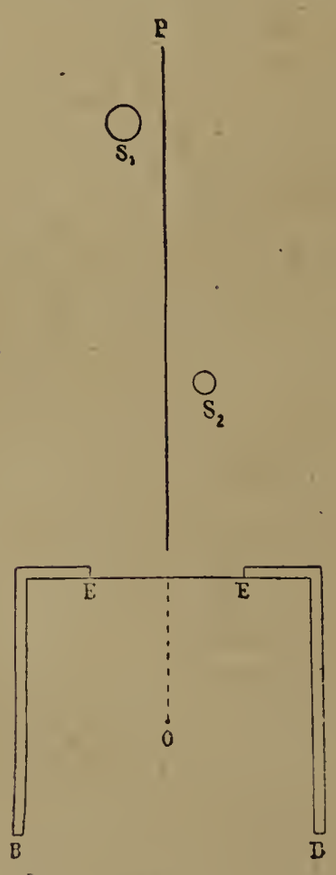


Fig. 99.

Voici sa description à peu de chose près.

Les sources S_1 et S_2 éclairent les moitiés d'un écran translucide E qu'on regarde en se plaçant en O. Une plaque mince métallique P (noircie sur ses deux faces pour n'envoyer aucune lumière sur E) protège chaque moitié de l'écran contre la lumière envoyée par la source placée devant l'autre. L'écran E est en verre dépoli, en porcelaine mince, en papier huilé, bref en un corps translucide d'un grain régulier et fin. Deux règles divisées déterminent les distances des sources à l'écran E.

L'œil étant sur le prolongement de la plaque P, on observe les surfaces éclairées à peu près normalement. Les sources sont assez voisines de la plaque P pour que les rayons émis tombent quasi normalement sur ces surfaces. Pour protéger l'œil contre les lumières étrangères, l'observateur met sa tête dans une boîte BB.

Enfin on peint en noir mat les murs de la salle où l'on opère, et les objets volumineux qu'elle contient.

L'expérience consiste à modifier les distances r_1 et r_2 des sources

jusqu'à obtenir l'égalité des *éclairements*, par suite l'égalité des *éclats* des moitiés de l'écran translucide :

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}, \qquad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}; \qquad E_1 = E_2, \qquad \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2.$$

Les intensités sont alors entre elles comme les carrés des distances correspondantes.

2° — Le photomètre de Ritchie (fig. 100, en haut) diffère du précédent par l'adjonction de deux miroirs à 45°; ils permettent d'éloigner les

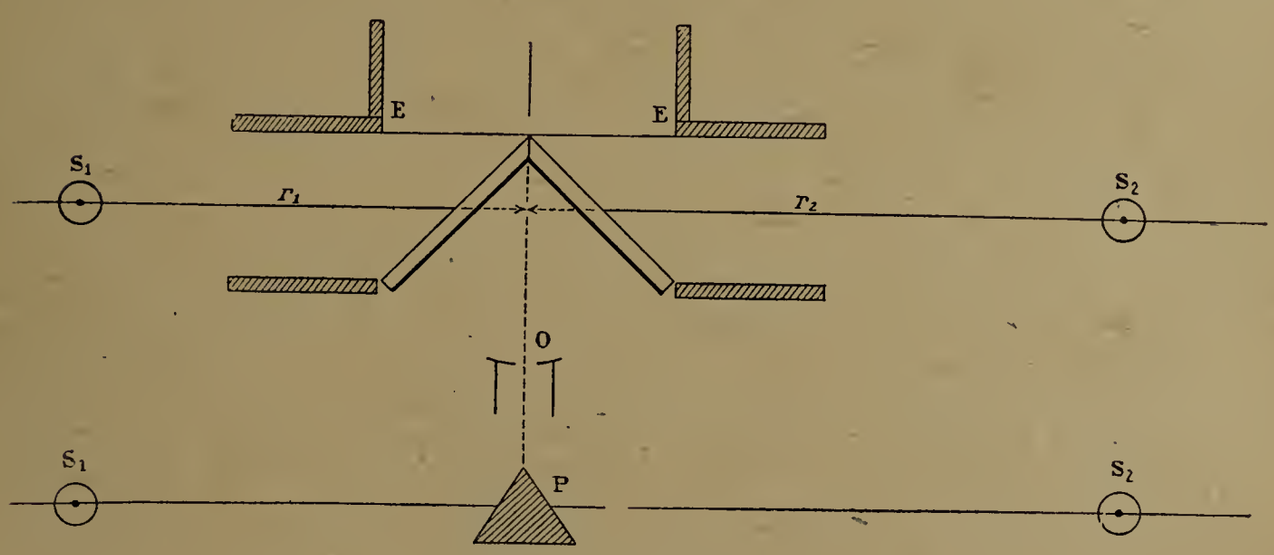


Fig. 100.

sources l'une de l'autre et de les placer plus normalement aux surfaces éclairées. Les miroirs sont aussi identiques que possibles et se raccordent exactement de manière que les plages à comparer soient au contact. Peu importe que la réflexion ait lieu simultanément par la face avant et la face arrière étamée.

3° — Au lieu de deux miroirs à 45°, on peut disposer deux surfaces opaques faisant un angle de 70° environ (prisme P), recouvertes d'une substance mate blanche (fig. 100 en bas).

On supprime le verre dépoli EE; on regarde dans un œilleton O qui fixe l'œil dans le plan bissecteur du dièdre diffusant.

4° — Le lecteur construira à peu de frais un photomètre de Bouguer avec du papier huilé. Il vérifiera que l'égalité des *éclats* obtenue avec les sources voisines de l'écran P, ne subsiste pas si on écarte latéralement l'une des sources. Pourtant l'*éclairement* de la moitié correspondante du papier ne change sensiblement pas; mais le diffuseur n'étant pas orthotrope (voir mon Cours d'*Optique Géométrique*), l'*éclat*, dans la direction où l'on regarde, diminue. Le coefficient de proportionnalité entre ce que le papier reçoit *au total* et ce qu'il émet *dans une direction donnée*, est modifié; les coefficients ne sont plus les mêmes pour les deux moitiés du papier.

107. Photomètre de Lambert-Rumford.

1° — En E est un écran (papier ou verre dépoli), en B un cylindre de bois de 2 centimètres de diamètre environ. Les sources à comparer S_1 et S_2 donnent des ombres S'_1 et S'_2. On amène les ombres très près l'une de l'autre, en rapprochant convenablement les sources de la normale ON à l'écran. L'ombre S'_1 est éclairée seulement par la source S_2; l'ombre S'_2 est éclairée seulement par la source S_1; le reste de l'écran est éclairé simultanément par les deux sources.

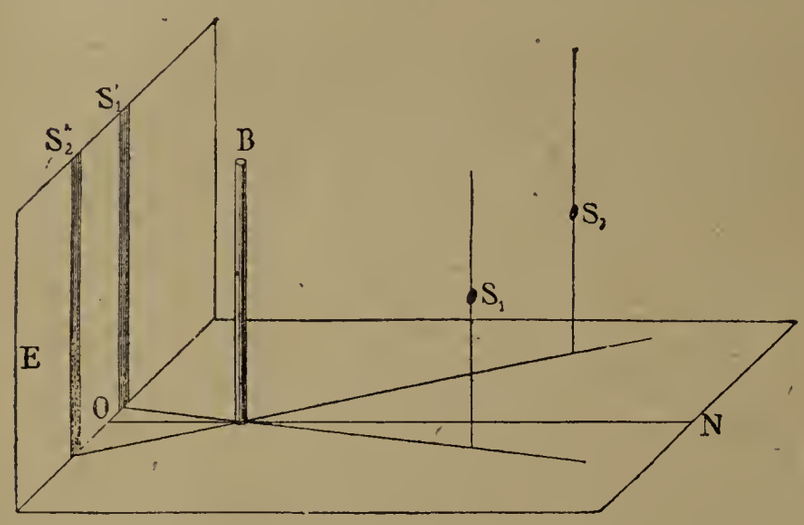


Fig. 101.

On rapproche ou l'on éloigne de l'écran E l'une des sources jusqu'à ce que les ombres aient même éclat. Les éclairements dus aux deux sources sont alors égaux : leurs intensités sont comme les carrés de leurs distances à l'écran.

La position de la baguette B est indifférente; mais, afin d'éviter les pénombres, il faut qu'elle soit voisine de l'écran E.

2° — La figure 102 représente la contre-partie du dispositif de Lam-

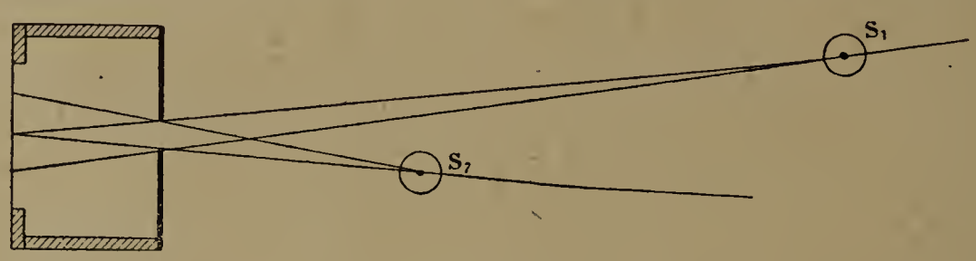


Fig. 102.

bert. La baguette est remplacée par une fente dans la paroi antérieure d'une caisse *plate* dont le fonds vertical est un verre dépoli.

On s'arrange de manière que les bandes éclairées soient au contact.

On déplace les sources S_1 et S_2 jusqu'à obtenir l'égalité des éclats, par suite celui des éclairements.

108. Photomètres de diffusion.

1° — Deux blocs identiques B_1, B_2, de paraffine, de stéarine, de verre opalescent (substances translucides et diffusantes) sont séparées par une mince feuille d'étain (fig. 103).

Les sources sont en S_1 et S_2; on regarde en plaçant l'œil en O.

Lorsque les éclairements des faces de la lame d'étain sont égaux, les

blocs paraissent également éclairés de part et d'autre de cette lame

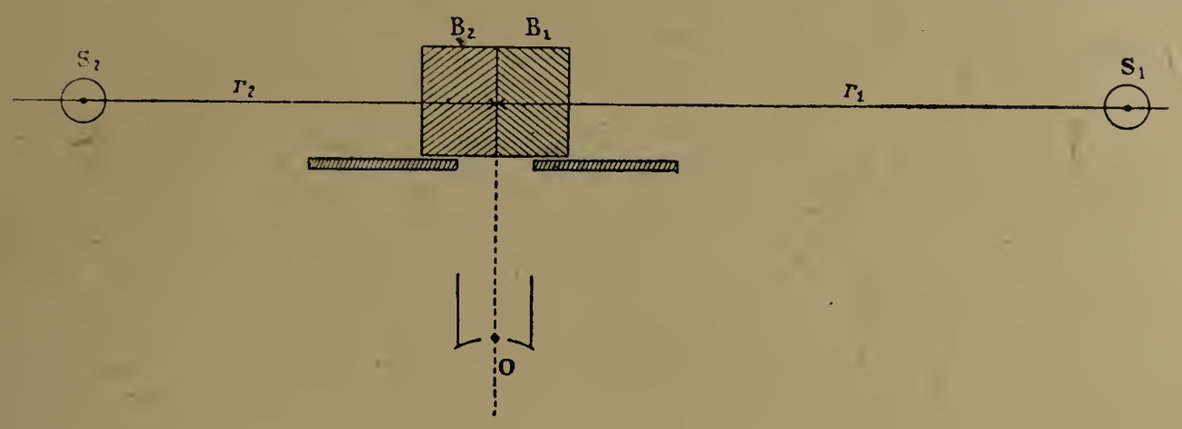


Fig. 103.

qui vue de champ apparaît comme une fine raie noire (Joly et Elster).

2° — Photomètre a tache d'huile (Bunsen).

Une feuille de papier P est tendue normalement entre les sources (fig. 104); elle porte une tache d'huile, de stéarine ou de paraffine.

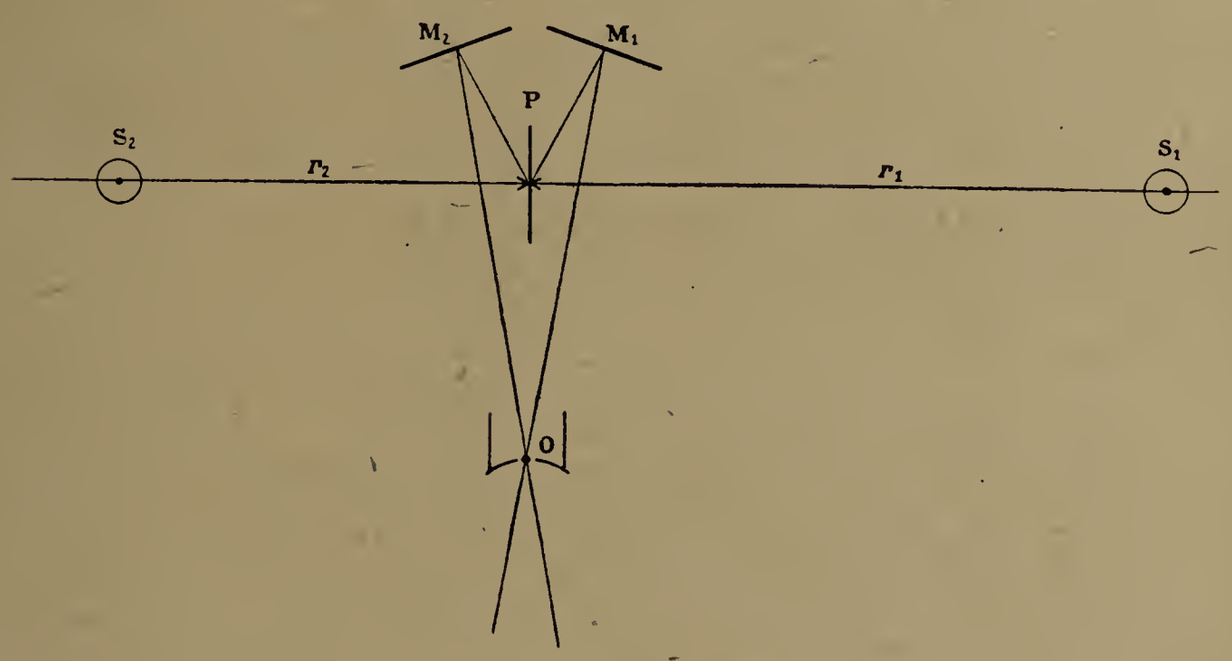


Fig. 104.

On en regarde les faces du point O par réflexion sur les miroirs M_1 et M_2.

Indépendamment de toute théorie, si la tache apparaît également brillante des deux côtés, les éclairements sont égaux; on a :

$$I_1 : r_1^2 = I_2 : r_2^2.$$

L'expérience montre que pour une certaine disposition des sources la tache disparaît *d'un côté*. On peut écrire :

$$\frac{I_1}{r_1^2} = k\,\frac{I^2}{r_2^2}.$$

Faisons-la disparaître *de l'autre côté;* on a :

$$k\frac{I}{R_1^2}=\frac{I_2}{R_2^2}. \qquad \text{Par suite :} \qquad \frac{I_1}{r_1R_1}=\frac{I_2}{r_2R_2}.$$

D'où deux méthodes de comparaison.

Comme on n'est jamais sûr de l'identité des faces du papier, on échangera les sources, on recommencera les mesures et on prendra la moyenne.

109. Photomètre Lummer et Brodhun.

1° — Les sources à comparer S_1 et S_2 sont placées sur un banc d'optique de 3 à 4 mètres, chemin de fer raboté sur lequel glissent ou roulent des supports.

Une graduation en millimètres repère leurs positions.

Elles éclairent un écran E, normal à la droite qui les joint et *diffusant* aussi également que possible par ses deux faces. L'expérience consiste

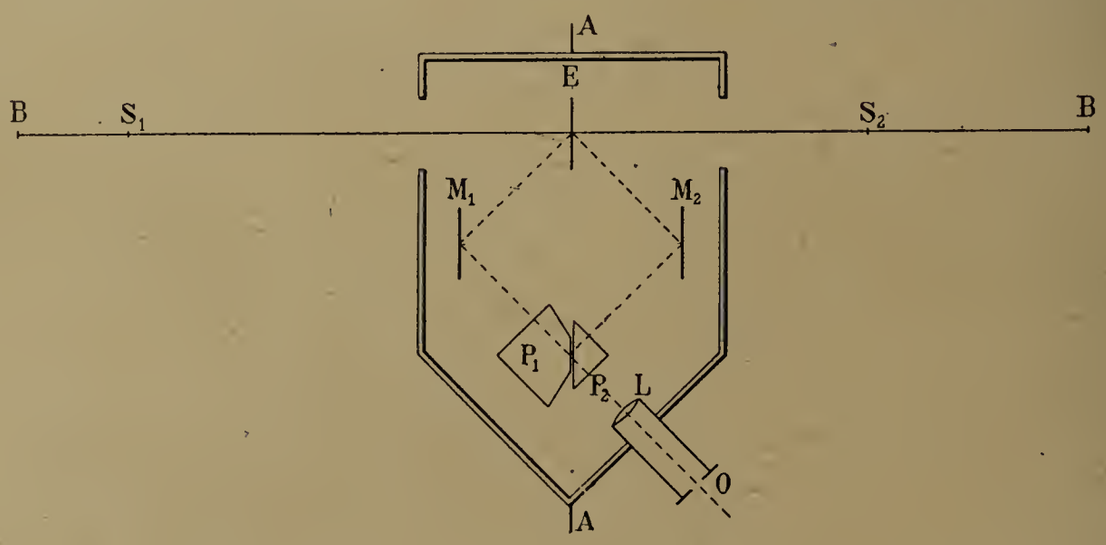


Fig. 105.

à déplacer les sources jusqu'à ce que les faces soient également éclairées. Pour vérifier qu'il en est ainsi, elles éclairent respectivement deux parties contiguës du champ observé par l'œil O à travers la loupe L.

En M_1 et M_2 sont des miroirs.

Le prisme rectangle P_2 et le parallélipipède P_1 du même verre sont *en contact optique* sur une petite partie de leur surface : on les colle avec une couche très mince de baume de même indice.

La partie en contact optique laisse passer, sans en réfléchir, la lumière qui vient de M_2; elle n'est éclairée que par M_1 et par la face correspondante de l'écran E.

Sur le reste du champ, la lumière issue de M_2 se réfléchit totalement; la lumière issue de M_1 est éliminée par réflexion : on ne reçoit que le faisceau envoyé par M_2 et par la face correspondante de l'écran E.

L'œil vise la face hypoténuse du prisme P_2 à travers la loupe L (généralement achromatique).

Si les deux parties du champ, dont la ligne de démarcation est par-

aitement nette, sont également éclairées, on cesse de les distinguer. L'expérience consiste donc à déplacer les sources jusqu'à ce que le champ paraisse uniforme.

Comme il peut exister une petite différence entre les deux faces de l'écran E ou entre les absorptions dans les deux moitiés de l'appareil, on recommence l'expérience après avoir fait tourner celui-ci de 180° autour de l'axe AA normal au banc d'optique; on prend la moyenne des résultats. On parvient ainsi à comparer les intensités de deux sources de même composition à 0,5 p. 100 près.

2° — Dans un autre dispositif (fig. 106), le système des prismes P_1P_2 est remplacé par deux prismes isocèles rectangles accolés par leurs faces hypoténuses. Par un procédé quelconque, imaginons creusées

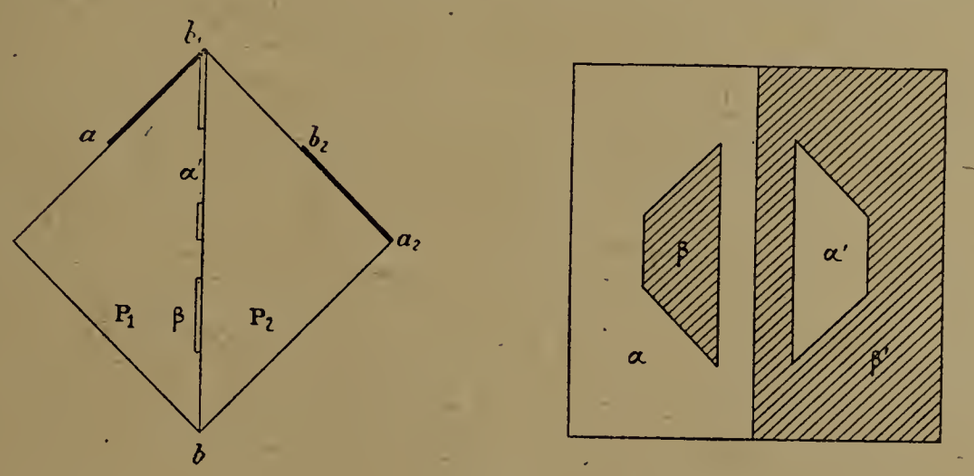


Fig. 106.

certaines parties de la face hypoténuse de P_1; elles sont représentées ombrées dans la figure 106 à droite. Nous retombons sur le dispositif précédent avec cette différence que les portions où la réflexion est totale et celles où la lumière passe librement, sont limitées non plus par une circonférence, mais par un dessin de forme plus compliquée.

Voici où la méthode diffère de la précédente.

Deux lames de verre fumé a_1b_1, a_2b_2, ne laissant passer que 92 p. 100 de la lumière, recouvrent respectivement chaque moitié du champ. Comme précédemment on regarde au moyen d'une loupe à long foyer la face bb_1, sous une incidence moyenne de 45°.

Si les éclairements sont égaux, les aspects sont les mêmes des deux côtés du champ. En effet l'aire β qui est éclairée à travers a_2b_2 paraît plus sombre que ce qui l'entoure; de même l'aire α' qui est éclairée à travers a_1b_1. Cet effet d'*égalité* de contraste est plus facile à saisir que la disparition des lignes de séparation dans le premier dispositif.

110. Photomètre de Weber.

Une glace opaline G_2 est éclairée par la source mobile S_2 placée à la distance r_2 (fig. 107). La glace opaline G_1 mobile dans le tube T est à la distance r, de la source fixe S_1.

L'œil O vise à travers la loupe achromatique L la face hypoténuse

commune des prismes $P_1 P_2$ disposés comme dans le photomètre Lummer et Brodhun. Quand la ligne de démarcation des plages disparaît, on a :

$$\frac{I_1}{r_1^2} = k\frac{I_2}{r_2^2},$$

où k est une constante de l'appareil.

Le seul point qui ne soit pas évident, est la non-intervention de la distance de la glace G_1 au prisme P_2. Elle tient à ce que quand la glace G_1 s'éloigne, chacun de ses éléments envoie dans l'œil une énergie en raison inverse du carré de la distance; mais le nombre des éléments

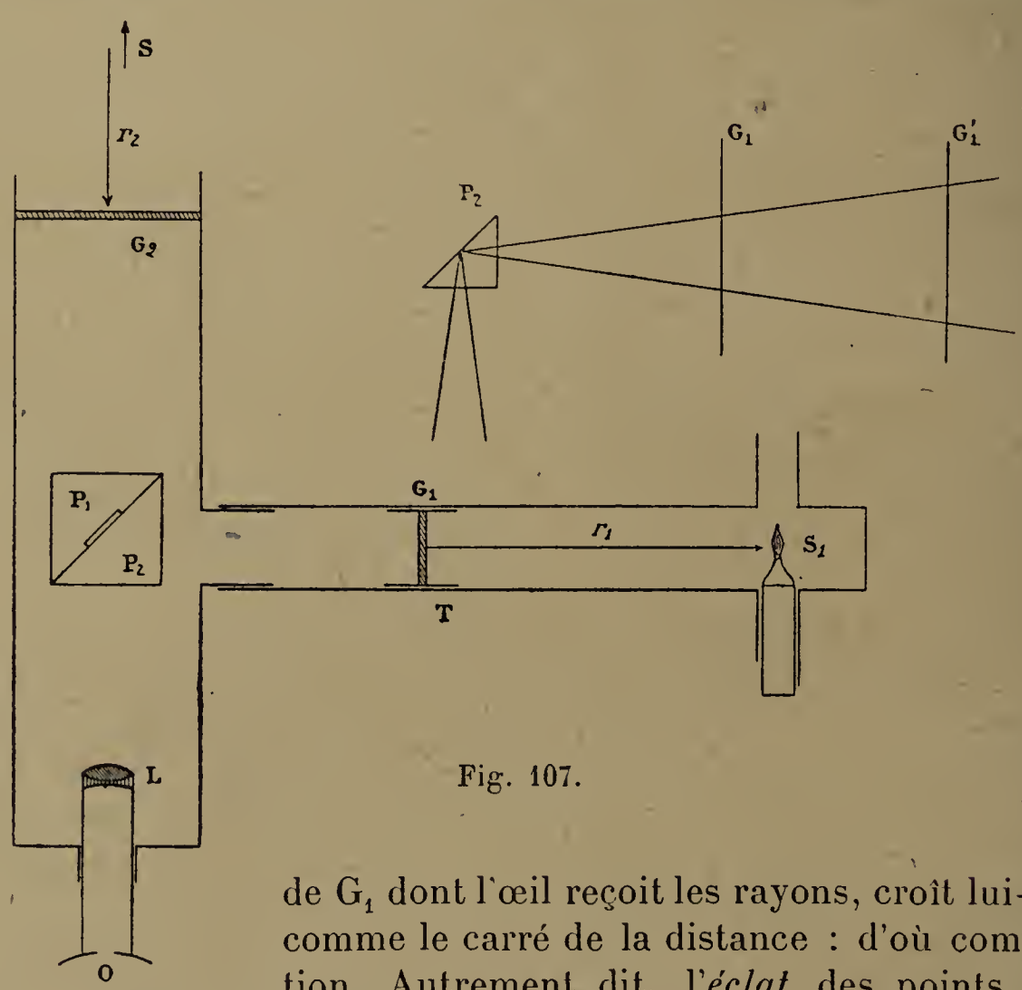


Fig. 107.

de G_1 dont l'œil reçoit les rayons, croît lui-même comme le carré de la distance : d'où compensation. Autrement dit, l'*éclat* des points de la portion éclairée par réflexion de la face hypoténuse de P_2 ne dépend que de l'*éclat* de la glace G_1. Mais pour que ce soit vrai, il faut donner à G_1 des dimensions suffisantes (voir la figure 107, en haut et à droite).

La constante k de l'appareil est déterminée, pour chaque état de la source S_1, au moyen d'une source S_2 connue (lampe Carcel par exemple), placée à une distance r_2 connue de la glace G_2

Cet appareil peut servir à mesurer les éclairements de la surface G_2 placée dans une salle, en un point et avec une orientation donnés.

L'appareil est alors étalonné en bougies mètre.

Photomètres non basés sur la diminution de l'éclairement avec la distance.

111. Lentilles de dispersion.

Il est parfois difficile d'obtenir l'égalité des éclairements en s'appuyant sur la loi de l'inverse du carré de la distance; on doit placer la source la plus faible trop près, ou la source la plus intense trop loin de l'écran. Dans le premier cas, tous les points de la source ne sont plus approximativement à égale distance de l'écran; dans le second, on est empêché par les dimensions de la salle où l'on opère.

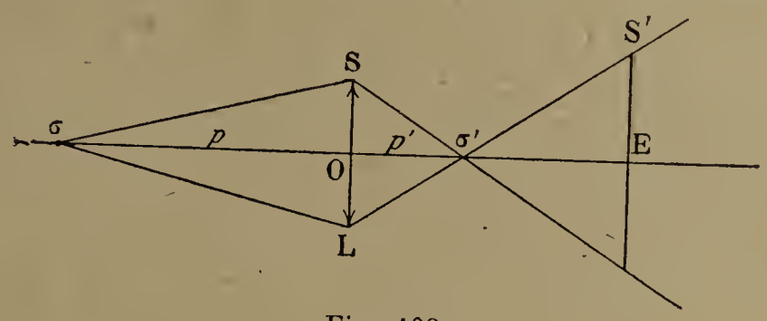


Fig. 108.

On tourne la difficulté par l'emploi de lentilles de *dispersion*. Les figures 108 et 109 montrent la disposition de l'expérience avec des lentilles convergentes et divergentes. La source σ donne une image réelle ou virtuelle en σ'; on s'arrange de manière que la divergence des rayons émis par l'image soit plus grande que celles des rayons émis par la source. Calculons l'éclairement E

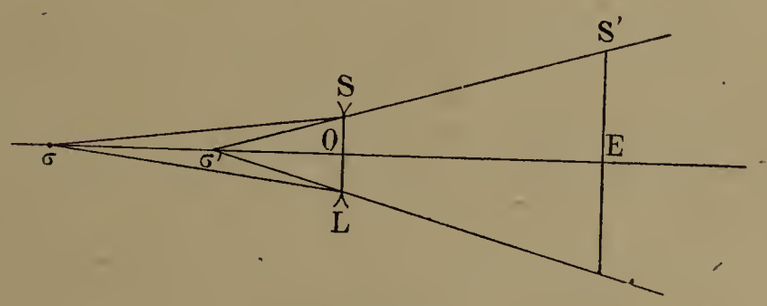


Fig. 109.

sur l'écran placé à une distance $\overline{OE} = R$ de la lentille. Soit S l'ouverture de la lentille, S' la surface correspondante de l'écran. On a :

$$\frac{S}{S'} = \left(\frac{p'}{R \pm p'}\right)^2, \quad Q = \varepsilon\sigma\frac{S}{p^2}, \quad E = \frac{Q}{S'} = \frac{\varepsilon\sigma}{p_2}\left(\frac{p'}{R \pm p'}\right)^2.$$

p' étant pris en valeur absolue, le signe — convient à la lentille convergente, le signe + à la lentille divergente.

On calcule p' connaissant la distance focale principale de la lentille et la distance p de la source à celle-ci.

Ce calcul ne tient pas compte des pertes de lumière par réflexion sur les faces de la lentille et par absorption dans la traversée du verre.

On peut les déterminer par une expérience préliminaire, ou les calculer au moins approximativement.

112. Emploi d'un objectif d'ouverture variable.

1° — Pour graduer la lumière reçue par l'œil, on se sert parfois d'un

diaphragme percé d'une ouverture d'aire variable, placé contre la lentille de projection.

Cherchons à quelle condition un tel artifice est légitime.

Soit E l'écran diffusant servant de source lumineuse. La lentille L diaphragmée en donne une image E′ que nous allons d'abord supposer se formant dans l'air. Elle émet donc non pas dans toutes les directions,

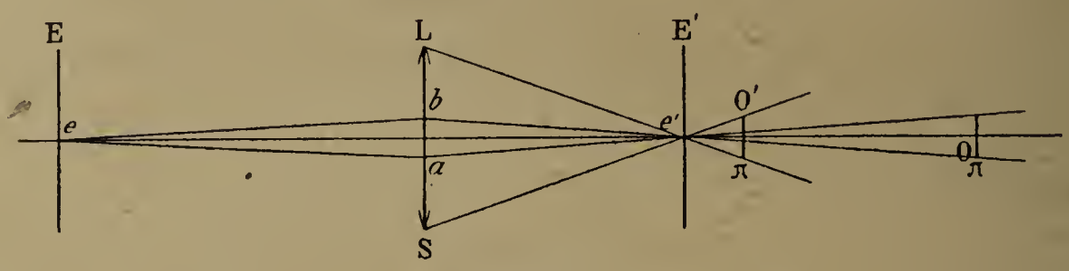


Fig. 110.

mais seulement dans les cônes remplis par la lumière qui la forme.

Regardons le point e' de l'image à l'œil *nu*; il faut placer l'œil assez loin, en O par exemple. Soit π la pupille.

Or la pupille est complètement couverte par le flux qu'émet le point e à travers la lentille, par conséquent par le flux qu'émet le point e', quand le diamètre du trou du diaphragme est supérieur à ab. L'accroissement de l'ouverture à partir de ce diamètre augmente l'angle

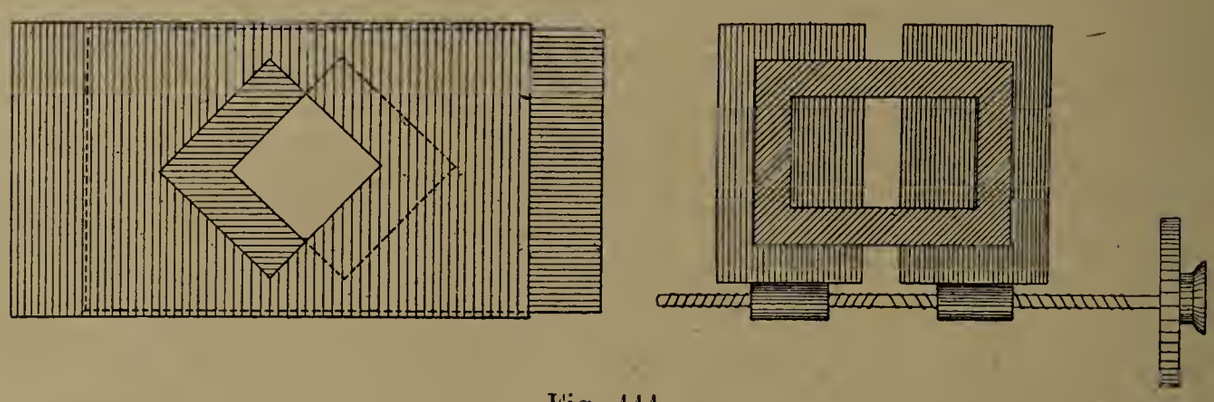


Fig. 111.

solide du cône lumineux émis par e', mais non le flux qui tombe sur l'œil, ni par conséquent l'éclairement de la rétine.

Pour que l'emploi du diaphragme soit légitime, il faut donc placer l'œil à une distance O′ telle que l'angle solide sous lequel est vue la pupille du point e' soit *au moins* égal à l'angle solide sous lequel est vue du même point *la plus grande ouverture* de la lentille. Comme la distance $O'e'$ est petite, il faut observer l'image E′ avec une loupe.

Au contraire si en E′ nous plaçons un écran diffusant, le point e' émet dans chaque direction proportionnellement à la lumière totale reçue et à peu près indépendemment des directions d'incidence : la position de l'œil devient indifférente.

2° — Forme du trou.

Le trou est constitué par une fente dont les bords s'écartent symétriquement, ou par un *œil de chat* (fig. 111).

Les pièces sont mues en sens inversès par une vis à filets de sens contraires, ou par une crémaillère double, analogue à celle qui actionne la barre verticale de fermetures des fenêtres ordinaires.

113. Comparaison des éclats de deux sources.

1° — Aussi près que possible des sources (fig. 112, à droite), on place des écrans percés de trous rectangulaires qui délimitent les portions à

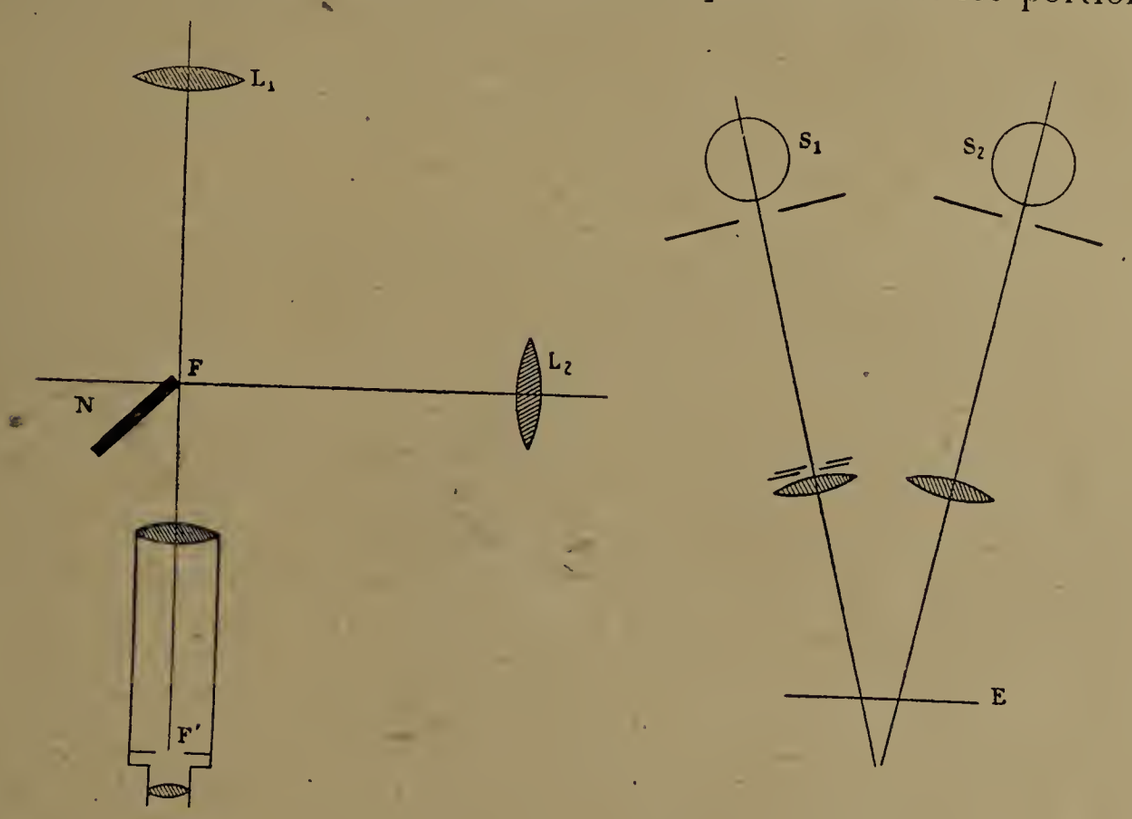


Fig. 112.

comparer. Au moyen de deux objectifs achromatiques aussi identiques que possible, on projette ces trous sur un écran E de manière que leurs bords affleurent. On amène l'égalité des éclats des images en diaphragmant plus ou moins l'un des objectifs, comme il est expliqué au paragraphe précédent.

2° — Autre méthode.

Les sources S_1 et S_2 assez éloignées sont respectivement sur les axes des lentilles L_1 et L_2 qui en donnent des images réelles en F (fig. 112, à gauche).

En N est un verre noir à 45° des axes, terminé par une arête rectiligne. On regarde cette arête et simultanément les images réelles des sources (l'une directement, l'autre par réflexion sur le verre) avec un microscope à long foyer. On voit ainsi juxtaposées les images de deux portions des sources S_1 et S_2.

Pour comparer leurs éclats, on amène à l'égalité les éclats des images

en diaphragmant convenablement une des lentilles L. On limite les portions des sources à comparer au moyen d'un diaphragme placé en F′ dans le plan F′ où se forment les secondes images réelles des sources.

On transforme l'appareil en spectrophotomètre en installant une fente en F et en remplaçant le microscope par un spectroscope (à vision directe par exemple).

114. Photomètres divers.

1° — Sur les mêmes principes on a construit de nombreux photomètres dont on ne voit pas très distinctement les différences (photomètre Mascart, Mascart-Pellin, Blondel-Broca). En voici le schéma (fig. 113).

Deux écrans diffusants E (en papier mince, ...) sont éclairés au

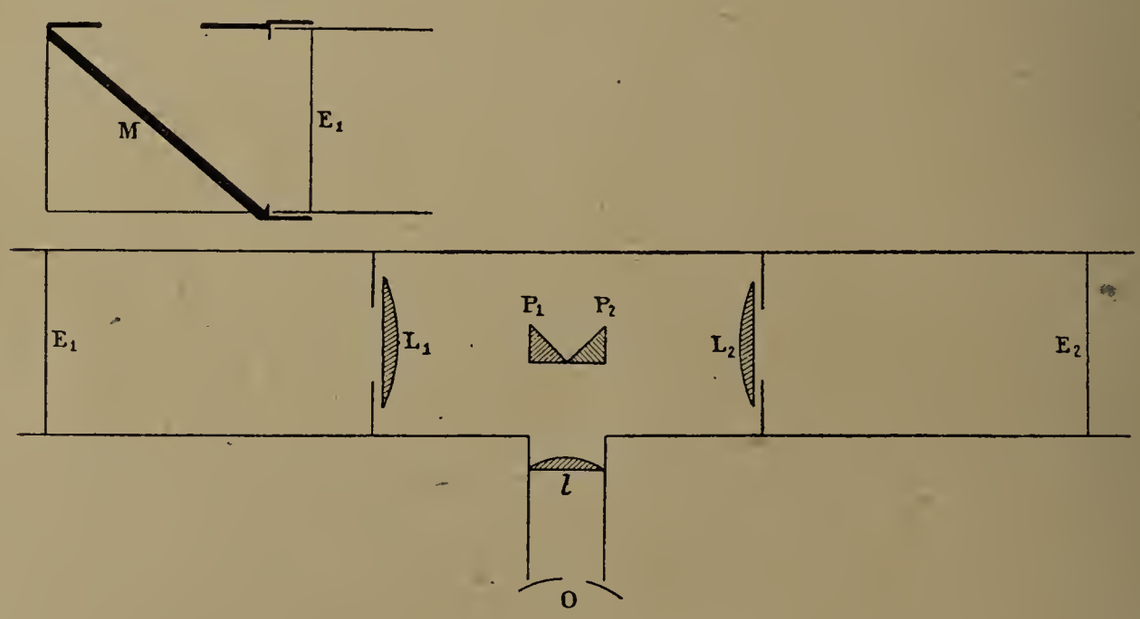


Fig. 113.

moyen des sources à comparer. On en obtient deux images réelles voisines dont on modifie et égalise les éclats en diaphragmant plus ou moins les lentilles de projection L. On regarde ces images à travers la loupe *l* par réflexion sur les prismes P.

Ajoutez à cela un nombre variable de miroirs et de prismes supplémentaires, vous obtenez une foule d'appareils pour la description desquels je renvoie aux notices des constructeurs.

Ils peuvent servir de photomètres proprement dit : on éclaire normalement les écrans E au moyen des sources à comparer.

Ils peuvent servir à étudier les éclairements aux divers points d'une salle. On monte sur l'un des bouts de l'appareil un miroir M qu'on peut orienter dans toutes les directions et qui renvoie la lumière reçue sur l'écran E_1. On éclaire l'écran E_2 avec une petite lampe fixe à la flamme de laquelle on donne une hauteur convenable (§ 143). L'éclat de E_2 sert de terme de comparaison. L'étalonnage consiste à mettre un carcel à un mètre de l'écran E_1 (le miroir M étant en place) et à diaphragmer les lentilles de manière que les écrans aient même éclat. L'éclai-

rement sur E_1 sera de n carcels, si pour l'égalité des éclats, les ouvertures superficielles des diaphragmes sont dans un rapport n fois plus grand.

2° — La figure 114 représente un dispositif simple pour manipulations. Les sources S éclairent les écrans diffusants E dont ils sont aux distances r. Les lentilles L donnent des écrans deux images adjacentes

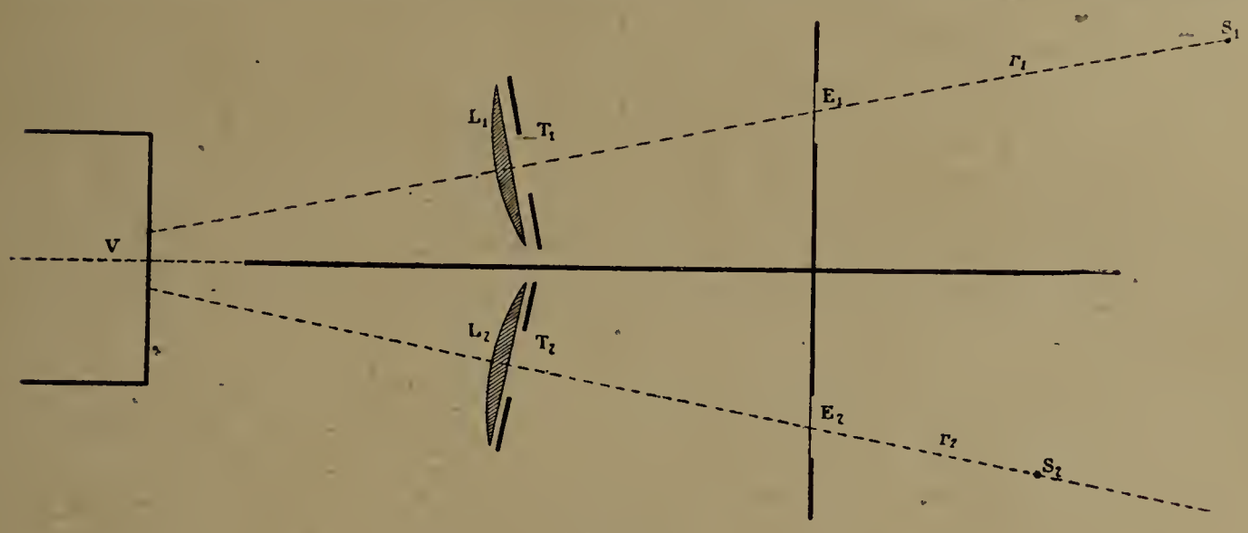


Fig. 114.

sur le verre dépoli V. On diaphragme les lentilles au moyen de cartons percés d'ouvertures d'aires σ connues.

On ramène les images au même éclat en déplaçant les sources.

Appelons I les intensités; on vérifiera les relations :

$$\frac{I_1 \sigma_1}{r_1^2} = \frac{I_2 \sigma_2}{r_2^2}.$$

Si l'une des sources S reste fixe, on vérifiera pour l'autre la relation :

$$\sigma : r^2 = \text{Constante}.$$

115. Emploi de coins absorbants.

L'appareil se compose de deux coins de verre fumé opposés, formant une lame à faces parallèles. En déplaçant les coins l'un devant l'autre, on modifie à volonté l'épaisseur de la lame. On détermine l'éclat d'une étoile en mesurant l'épaisseur de verre fumé qui la fait disparaître.

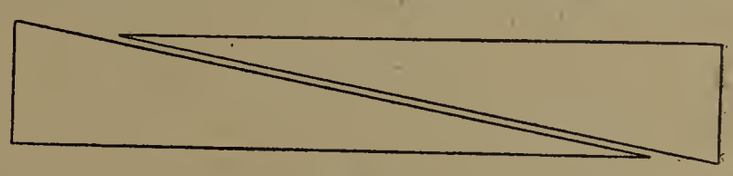


Fig. 115.

Nous trouverons plus loin (§ 125) d'autres procédés pour réduire la lumière dans un rapport connu.

Loi de Fechner.

Nous énoncerons ici la loi *dite de Fechner* (en réalité elle est due à Bouguer) parce que, rigoureusement exacte ou non, elle sert de terme de comparaison.

116. Principe de Bouguer; loi de Fechner.

1° — L'œil cesse d'apprécier la différence entre deux éclats E et $E + \Delta E$, lorsque ΔE est une fraction constante de E : tel est le fait expérimental déjà connu de Bouguer.

Posons que les éclats, pour paraître différents, doivent correspondre à une variation toujours la même de la sensation; nous devons écrire :

$$dS = a \frac{dE}{E}.$$

D'où :

$$S = a \log E + b; \qquad (1)$$

c'est la loi de Fechner.

Ainsi cette loi est une hypothèse greffée sur un fait expérimental.

Il ne faut évidemment pas prendre la loi au pied de la lettre; elle

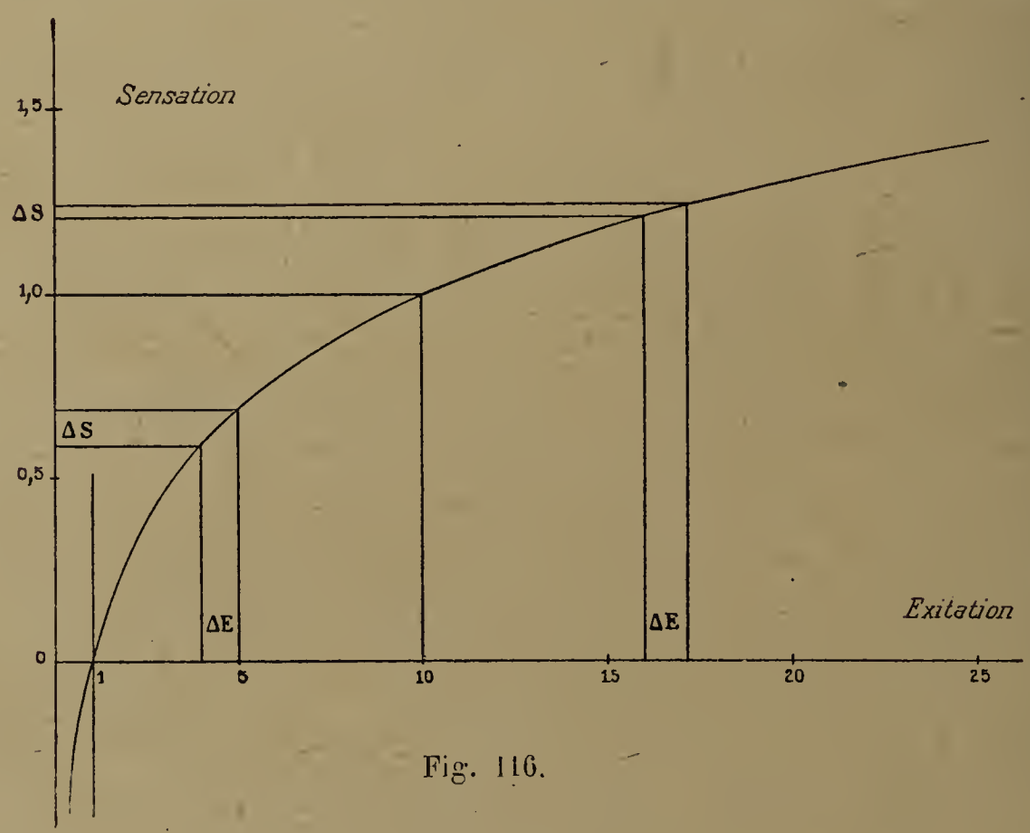


Fig. 116.

donne $S = -\infty$ pour $E = 0$. On veut dire seulement que la relation entre l'excitation E et la sensation S est représentée par une courbe analogue à celle de la figure 116 qui correspond aux logarithmes vulgaires. Du reste nous ne connaissons aucun procédé pour mesurer numériquement la sensation; il n'est donc pas question de vérifications quantitatives.

Voici les expériences qui prouvent l'exactitude sinon de la loi (1), au moins d'une loi d'allure analogue.

2° — Disposons l'expérience comme l'indique la figure 117.

Sur l'écran blanc la bougie donne l'ombre de la baguette. Nous déplaçons un bec Auer sur la ligne AB prise de manière que l'ombre correspondante ne nous gêne pas. L'écran reçoit donc un éclairement *variable* E dû au bec, en tous ses points sauf dans l'ombre de la baguette

où l'éclairement est E — ΔE. La bougie restant fixe, ΔE est constant

Si le bec Auer est loin (E petit, ΔE : E grand), l'ombre de la baguette apparaît nettement. On rapproche le bec, E grandit, ΔE : E diminue. On trouve une position du bec à partir de laquelle ΔE : E est trop petit pour que l'ombre soit visible; elle est noyée dans l'éclairement général.

Dans cette expérience ΔE est constant; nous faisons varier E.

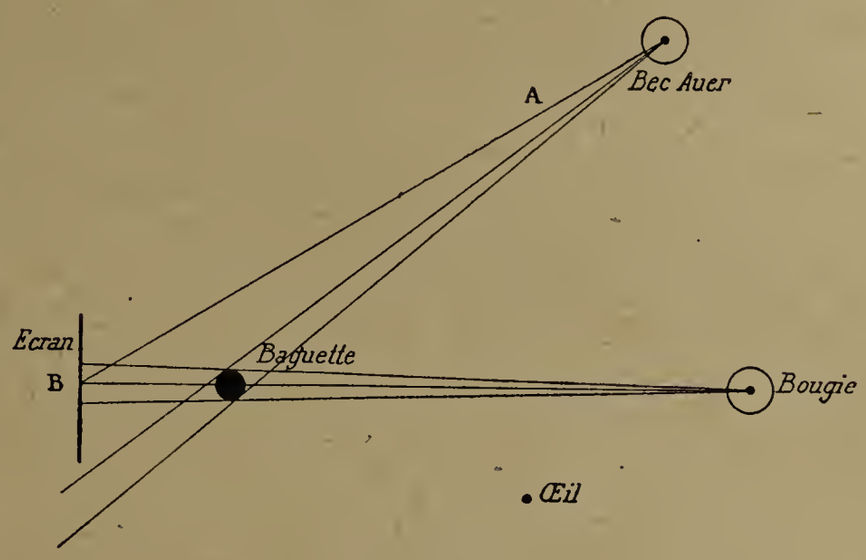


Fig. 117.

3° — Nous pouvons maintenir ΔE : E constant, tout en modifiant E. Pour cela avec de l'encre de Chine étendue d'eau, traçons un dessin sur une glace sans tain. Plaçons-la devant un verre dépoli dont nous modifions l'éclat, par exemple en approchant ou éloignant un bec Auer. L'expérience montre que pour des éclats ni trop faibles, ni trop forts du verre dépoli, nous distinguons *avec une netteté constante* les détails du dessin : ce qui est conforme à la loi de Fechner.

Pour de très petits éclairements, nous ne distinguons rien; pour de très forts, nous sommes éblouis : la loi de Fechner ne s'applique donc qu'aux éclairements moyens. Dans cette expérience, l'absorption relative due au dessin est indépendante de l'intensité du faisceau qui le traverse; ce qui revient à dire que ΔE : E est constant.

C'est un fait d'expérience vulgaire que le détail des peintures, dessins, cartes,... se distingue avec une égale facilité pour des éclairages très différents.

4° — Reste à savoir quelle est la valeur du rapport ΔE : E pour lequel la variation est perceptible.

Il est clair qu'il varie beaucoup avec l'œil, son éducation, les conditions physiologiques actuelles,...

Les évaluations varient de 1 : 60 à 1 : 120.

3° — Ici se pose un problème sur lequel nous aurons l'occasion de revenir (§ 129).

Nous pouvons recommencer les expériences avec une série de radiations, sinon simples, du moins dont les longueurs d'onde sont comprises dans un petit intervalle. Qu'arrive-t-il alors? La sensibilité mesurée par le quotient ΔE : E reste-t-elle la même, quel que soit E? En d'autres termes, dans leur partie moyenne, les courbes sont-elles toujours assimilables à des logarithmiques?

A supposer qu'il en soit ainsi, le quotient $\Delta E : E$ a-t-il la même valeur pour toutes les radiations simples?

117. Vérification de la loi de Fechner au moyen de disques tournants.

1° — Nous reviendrons plus loin sur l'étude générale de la persistance des impressions lumineuses. Admettons qu'*une intensité périodiquement variable produit le même effet qu'une intensité continue de même somme, pourvu que la période soit assez courte* (principe de Talbot, § 164).

Traçons sur une partie d'un cercle blanc un secteur noir d'angle α de l'ordre de quelques degrés (fig. 118).

Mettons-le en rotation rapide.

En vertu du principe admis, au secteur correspond une couronne dont l'éclat est à l'éclat des parties intérieures et extérieures comme $1 - \alpha : 360$ est à l'unité.

Autrement dit, on a : $-\Delta E : E = \alpha : 360$.

Par exemple, pour $\alpha = 6°$, l'éclat de la couronne est plus faible que celui du fond de 1 : 60.

Fig. 118.

Si dans ces conditions l'œil voit la couronne se détacher sur le fond, il est sensible au soixantième.

La sensibilité qui, suivant l'observateur, varie de 1 : 60 à 1 : 120, est dans de larges limites indépendante de l'éclairement du disque tournant. Peu importe la vitesse de rotation pourvu qu'elle soit assez grande : on la fait varier de 30 à 200 tours par seconde sans qu'elle intervienne. Dans ce dernier cas, on utilise un disque de petites dimensions et un mouvement d'horlogerie.

La sensibilité est toujours plus grande lorsqu'on laisse errer le regard que lorsqu'on fixe un point invariable.

118. Photométrie par disparition d'une différence d'éclat. Expériences de Masson.

1° — Le principe de Bouguer sert de base à une curieuse méthode photométrique.

Sur un écran d'éclairement E, projetons une petite surface à bords bien nets d'éclairement ΔE. Diminuons peu à peu ΔE jusqu'à ce que la petite surface disparaisse; au moment de la disparition, on a $\Delta E = k.\ E$, où k est un nombre (variable d'un observateur à l'autre) que le principe de Bouguer (ou la loi de Fechner) pose invariable pour un observateur déterminé. Connaissant ΔE, on détermine donc E en valeur relative.

Nous verrons plus loin comment la méthode s'applique à la photométrie hétérochrome (§ 133).

2° — Masson détermine par cette méthode les intensités lumineuses relatives des étincelles électriques.

Il fait tourner un disque analogue à celui de la figure 118, à droite. Soit n le nombre des secteurs, α l'angle qu'il couvrent. Prenons pour unité d'éclat celui du disque supposé uniformément blanc; quand le disque tourne, l'éclat est : $E = n\alpha : 360$.

Ceci posé, l'étincelle fait voir le disque *comme s'il était arrêté*, à la condition que l'éclairement ΔE qu'elle produit, soit suffisant.

Pour qu'au moment où éclate l'étincelle, le disque cesse d'être uniformément gris, on doit avoir :

$$\Delta E > E : k,$$

formule où le nombre k caractérise par hypothèse l'œil de l'observateur.

La méthode est contestable même en admettant le principe de Bouguer, c'est-à-dire la constance du nombre k.

Une étincelle envoie sur le disque mobile une quantité de lumière :

$$Q = \int_0^t e\,dt,$$

où t est sa durée; d'où un éclairement moyen :

$$\Delta E = \frac{1}{t}\int_0^t e\,dt.$$

En mettant les choses au mieux, la méthode mesure l'éclairement moyen ΔE. La durée de l'étincelle intervient donc au premier chef; car nous savons que cette durée est extrêmement variable suivant les conditions de la décharge. Au contraire Masson croit mesurer la quantité totale de lumière émise Q.

119. Transposition de l'échelle des intensités dans la peinture.

1° — En admettant que la loi de Fechner s'applique aux sensations moyennes, elle est en défaut aux deux bouts de l'échelle : pour les éclairements très faibles, les objets sombres ne sont pas plus lumineux que les plus sombres; pour les éclairements très intenses, les objets clairs ne sont pas moins lumineux que les plus clairs. Dans le premier cas, l'œil est en deça du seuil de la sensation; dans le second, il est ébloui. D'où la solution d'un problème qu'Helmholtz pose en ces termes : « Dans un musée se trouvent côte à côte : un tableau représentant le désert avec une caravane composée de Bédouins et de nègres enveloppés de vêtements blancs, s'avançant à travers la lumière ardente du soleil; un tableau représentant un clair de lune bleuâtre, où cet astre se réfléchit dans l'eau, où dans l'obscurité apparaissent des groupes d'arbres et de figures humaines. Les deux peintures sont éclairées par la même lumière; elles contiennent à peu près les mêmes blancs et les

mêmes noirs. Expliquer qu'elles puissent donner simultanément la sensation de ce qu'elles représentent. »

Les éclairements réels d'une étoffe blanche en plein soleil et au clair de lune sont dans un rapport qu'on évalue à 300 000. Quoi qu'il en soit de ce nombre, il est incontestable que l'étoffe blanche est représentée picturalement au plein soleil avec une intensité qui est une petite fraction de l'intensité réelle, tandis qu'elle est représentée au clair de la lune avec une intensité qui est un multiple élevé de l'intensité réelle. D'autre part le noir pictural n'est jamais absolument noir; il serait à peine assez foncé pour représenter la vraie luminosité d'un objet *blanc* éclairé par la lune.

2° — Voici la solution du problème posé.

Pour représenter un plein soleil, le peintre fait tous les objets presqu'également lumineux; pour représenter un clair de lune, il enveloppe presque tous les objets d'une ombre opaque et n'éclaire que les plus lumineux. S'il pouvait employer des couleurs d'un éclat aussi brillant que la lumière solaire ou aussi faible que la lumière lunaire, il pourrait conserver sur un tableau les rapports exacts des intensités. Mais devant utiliser dans tous les cas des intensités moyennes *auxquelles s'applique la loi de Fechner*, il est forcé d'introduire dans les rapports les variations même que l'inapplicabilité de la loi de Fechner aux deux bouts de l'échelle amènerait dans les rapports réels.

Il transpose donc les intensités suivant la loi même que les propriétés de l'œil réalisent pour les intensités réelles. Je reviendrai là-dessus au § 266.

Nous verrons que la loi de Purkinje amène une autre espèce de transposition : les blancs du plein soleil doivent être jaunis, les blancs du clair de lune doivent être bleuis. L'artifice serait inutile pour les intensités vraies; il devient utile pour les intensités dont on est obligé de se servir.

CHAPITRE II

PHOTOMÉTRIE CHROMATIQUE

120. Sources différemment colorées; repérage des couleurs simples.

1° — L'expérience vulgaire nous apprend que les sources usuelles émettent des lumières de colorations différentes. Surtout lorsqu'ils sont placés les uns à côté des autres, l'arc électrique paraît blanc, le bec Auer semble vert, le bec de gaz ordinaire jaune rougeâtre.

La lumière résulte de la superposition d'une infinité de radiations, *dites simples*, qui forment une gamme continue. Elles sont caractérisées

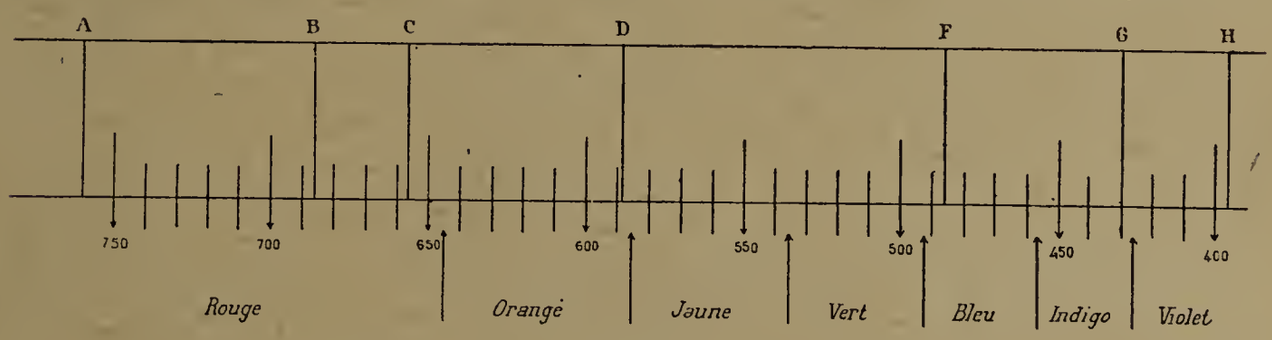


Fig. 119.

par leurs longueurs d'onde. Rappelons que ces longueurs sont définies sans ambiguité par la déviation D (évaluée en radians) que produit un réseau, c'est-à-dire un système de traits opaques, tracés sur une glace, de même épaisseur, parallèles et équidistants.

Soit m leur nombre par millimètre. La longueur λ (en millimètres) est (voir mon Cours d'*Optique Géométrique*) :

$$\lambda = D : m.$$

Les radiations simples produisent sur notre œil des sensations appelées *couleurs* qu'on classe, *dans l'ordre des longueurs d'ondes décroissantes*, en rouges, orangées, jaunes, vertes, bleues, indigos, violettes. Elles forment *une gamme continue*; il y a une infinité de sensations rouges différentes, une infinité de sensations orangées, etc.; les unes succèdent aux autres sans qu'il soit possible de préciser où commencent les orangées, où finissent les rouges....

Il ne faut donc pas prendre les divisions de la figure 119 pour autre chose qu'une manière de fixer les idées.

Voici les longueurs d'ondes des principales raies (exprimées en millionièmes de millimètre) et les milieux des espaces colorés.

A	759		
		700	Milieu du rouge.
B	687		
C	656		
		630	*Rouge fondamental de Maxwell.*
		621	Milieu du rouge orangé.
		597	Milieu de l'orangé.
D	587	589	Milieu du jaune orangé.
		581	Milieu du jaune.
		528	*Vert fondamental de Maxwell.*
E	527	527	Milieu du vert franc.
b	517		
		508	Milieu du vert bleu.
		496	Milieu du bleu cyané.
F	486		
		473	Milieu du bleu.
		457	*Bleu fondamental de Maxwell.*
		438	Milieu du bleu violet.
G	431		
		406	Milieu du violet pur.
H	397		
L	382		

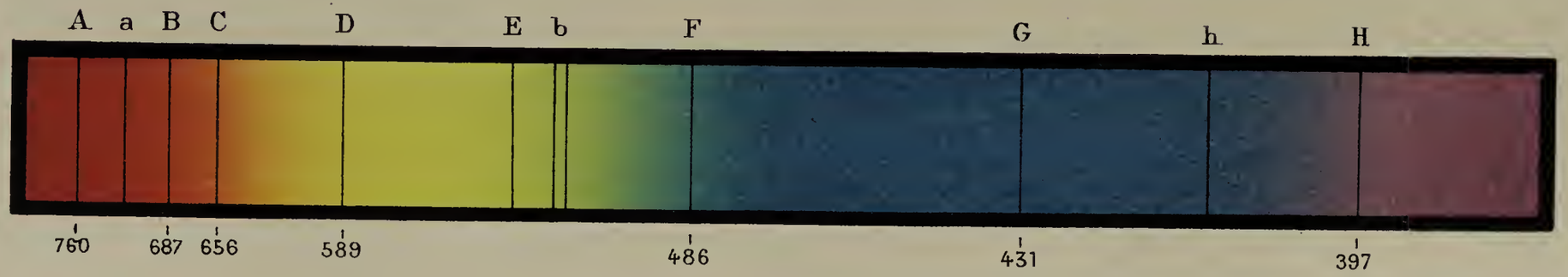
Voici pour fixer les idées, une liste de couleurs représentant à peu près les radiations simples.

Vermillon	$0^{\mu},629$	Bleu de cobalt. . . .	$0^{\mu},479$
Minimum	606	Outremer naturel . .	473
Jaune de chrôme pâle. .	582	Outremer artificiel . .	447
Vert émeraude. . . .	523	Violet Hoffmann B. B.	426
Bleu de Prusse. . . .	489		

La planche hors texte ci-jointe est tirée en lithographie à 4 couleurs plus le noir (§ 409).

I. — Spectre de solide incandescent.

II. — Spectre de la vapeur de sodium.



III. — Spectre solaire.

121. Définition du blanc. Unités relatives pour les intensités des couleurs simples.

1°. — Définition du blanc.

Lorsque les diverses radiations sont superposées, *avec certains rapports d'intensités*, on obtient du *blanc*; il y a d'ailleurs une infinité de mélanges différents qui donnent du blanc. Le blanc est l'indice d'une composition certainement complexe, il faut donc préciser sa définition.

Par convention le blanc objectif est la lumière envoyée par le soleil.

Immédiatement une objection se présente. La lumière que nous recevons du soleil, n'est pas celle qu'il nous envoie. Nous avons lieu de croire que cette dernière est d'une composition immuable; nous savons cependant que les soirs sont rouges et les aubes pâles. Cette variation tient à l'absorption par l'atmosphère.

Le blanc objectif est par convention la lumière solaire non modifiée par l'atmosphère.

Conséquemment il faut user de cette lumière par un beau jour, au voisinage de midi (la couche traversée est moindre et les rayons sont moyennement plus éloignés du sol); il est préférable d'opérer sur une montagne, ce qui diminue considérablement la masse d'air traversée et supprime la couche la plus absorbante.

2°. — Définition de l'intensité relative d'une radiation.

Une lumière est complètement déterminée quand on donne l'intensité de toutes les radiations qu'elle contient :

$$I = f(\lambda).$$

Il s'agit de définir l'unité d'intensité pour chaque radiation.

Par convention les intensités relatives égales pour les diverses radiations sont leurs intensités dans la constitution du blanc objectif.

Ainsi nous prenons le blanc, c'est-à-dire la lumière solaire, comme système de comparaison.

A la vérité, on peut définir l'intensité d'une radiation par l'énergie transportée en une seconde; mais on bute contre une quasi impossibilité expérimentale, l'énergie transportée par les radiations de petites longueurs d'onde, même dans un faisceau intense, étant extraordinairement faibles. De plus on se trouve amené à des expériences qui n'utilisent plus les procédés de l'Optique.

3°. — Détermination pratique des unités relatives d'intensité.

Dès lors voici comment on obtient les unités pratiques d'intensité des diverses radiations. Éclairons une fente F avec du blanc objectif (lumière solaire); recevons le faisceau sur un objectif achromatique et sur un réseau : nous réalisons un spectre pur.

C'est un spectre *normal*, c'est-à-dire où les distances des radiations sont proportionnelles à la variation des longueurs d'onde.

Dans ce spectre déplaçons une fente Φ de largeur invariable. Nous

déterminons ainsi des faisceaux dont la longueur d'onde moyenne correspond au centre de la fente.

Par convention, les intensités de ces faisceaux sont égales.

Évidemment les faisceaux ainsi obtenus ne sont pas monochromatiques; ils le sont d'autant plus exactement que la largeur de la fente Φ est plus faible. Mais pourvu que cette largeur soit petite, le faisceau *semble* monochromatique; ce qui suffit pour la suite.

Élargissons la fente F (celle-ci restant toujours assez étroite pour que la pureté de spectre subsiste *à la précision des expériences actuelles*) : nous augmentons toutes les intensités dans le même rapport; *elles restent égales par convention.*

De même quand nous élargissons la fente Φ.

Pour effectuer des mesures absolues, il faut remplacer les rayons solaires par les rayons d'une source aussi blanche que possible et dont nous puissions déterminer *a priori* l'intensité. L'opération est extrêmement difficile à cause des absorptions inévitables dans l'appareil disperseur.

122. Emploi d'un spectre prismatique.

Pour de nombreuses raisons pratiques, on utilise des spectres prismatiques. Mais ils ne sont pas normaux, *ils sont tassés dans le rouge*; autrement dit, si nous comparons deux spectres, l'un prismatique, l'autre normal, ayant même longueur entre les raies H et F par exemple, entre les raies F et A le spectre prismatique est plus court que le spectre normal : il y est par conséquent plus intense.

Fig. 121.

Reprenons l'expérience du paragraphe précédent. Dans un spectre prismatique déplaçons une fente Φ de largeur invariable : les faisceaux obtenus n'ont plus même intensité conventionnelle; ils sont plus intenses du côté rouge (où le spectre prismatique est tassé) que du côté violet (où le spectre prismatique est étalé).

Le facteur de correction est facile à calculer, si nous connaissons la loi de dispersion spectrale, c'est-à-dire, *dans le spectre*, les distances x

des radiations à une origine quelconque, distances exprimées en fonction de leurs longueurs d'onde.

Avec une approximation toujours suffisante, on a :

$$x = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}. \qquad (1)$$

Les constantes b et c sont déterminées par l'expérience.

A partir de l'origine $x = 0$, nous rencontrons dans le spectre d'abord les rouges (λ grand), puis les jaunes, ... , enfin les violets (λ petit) : dans la formule (1), x croît en effet quand λ décroît. Ceci posé, l'intensité d'un faisceau délimité par une fente de largeur invariable est proportionnelle au nombre de radiations reçues, c'est-à-dire à :

$$i = -\frac{d\lambda}{dx} = 1 : 2\left(\frac{b}{\lambda^3} + \frac{2c}{\lambda^5}\right);$$

Le coefficient i doit être calculé pour le λ qui correspond au centre de la fente. Autrement dit, pour obtenir des faisceaux d'intensités conventionnelles égales, la fente placée sur le spectre doit avoir une largeur $l : i$, qui croît quand on la déplace du rouge au violet.

Pour fixer les idées, le facteur de transformation, conventionnellement pris égal à 1 pour le bleu $\lambda = 0\ \mu,5$, est de l'ordre de 0,25 pour $\lambda = 0\ \mu,7$. Il est alors de l'ordre de 2 pour $\lambda = 0\ \mu,4$.

Bien entendu il varie avec le verre dont le prisme est formé.

123. Aspects différents de la photométrie chromatique.

La photométrie chromatique se présente sous deux aspects très différents.

Nous pouvons déterminer la composition des sources lumineuses; c'est l'objet de la *spectrophotométrie*. Pour intéressante qu'elle soit du point de vue théorique, elle n'a pas d'intérêt pratique. Peu nous importe en effet la composition d'une lumière; ce sont ses effets *visuels* qui interviennent.

Nous pouvons comparer les sources en bloc et sans souci de la composition de la lumière émise : c'est l'objet de la *photométrie hétérochrome*. Tandis que la spectrophotométrie ne soulève aucune difficulté théorique, la photométrie hétérochrome est un nid de questions délicates, mi-physiques mi-physiologiques qui la rendent extrêmement curieuse.

Spectrophotomètres.

124. Spectrophotomètres de Govi, de Vierordt, de Cornu.

1°. — Les spectrophotomètres sont tous basés sur le même principe. La fente d'un spectroscope est divisée en deux parties, séparément éclairées par les deux sources. En mettant au point sur la fente, on obtient deux spectres exactement superposés dont les couleurs se correspondent. Une fente *oculaire* de largeur variable permet d'en

isoler une région; elle est formée de deux lames de laiton noirci dont on fait varier l'écartement. Pour la description des spectroscopes, le lecteur se reportera à mon Cours sur *la Construction..... des Instruments de mesure et d'observation.*

Par un procédé quelconque (qui différencie les appareils), on amène à l'égalité les régions considérées des spectres; d'où résulte la spectrophotométrie.

La séparation de la fente en deux parties s'obtient au moyen de prismes à réflexion totale dont la figure 122 donne les formes ordinaires. A gauche, est un simple prisme isocèle rectangle dont une des faces

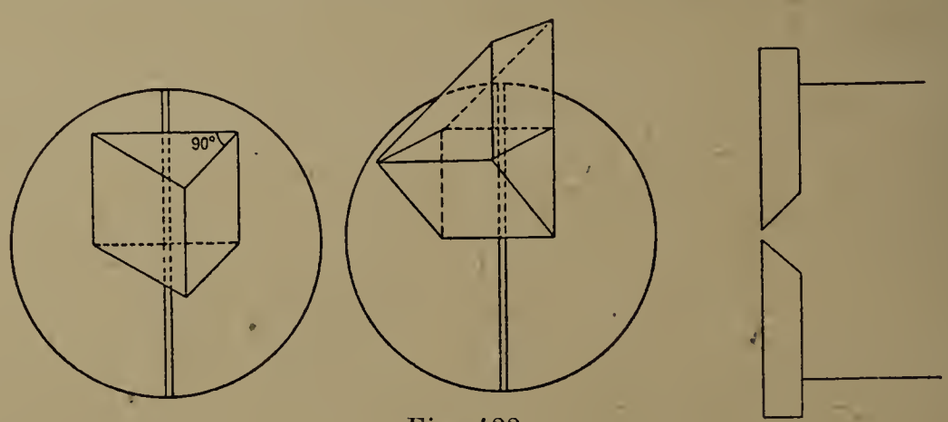


Fig. 122.

de l'angle droit est appliquée sur la moitié de la fente. Dans certains cas, la polarisation due à la réflexion totale, est gênante; on remplace alors le prisme précédent par un double prisme à réflexion : les deux réflexions produisent des effet inverses; la lumière incidente rectilignement polarisée sort rectilignement polarisée.

La fente doit tourner son double biseau vers l'intérieur du collimateur, de manière à présenter vers l'extérieur une surface plane.

C'est ce que montre schématiquement la figure 122 à droite.

2° — Photomètre de Govi.

Le procédé le plus simple pour modifier l'intensité d'un des faisceaux, est d'éloigner une des sources. La quantité de lumière qui tombe sur chaque moitié de la fente (abstraction faite de l'absorption par le prisme ordinaire à réflexion totale) est en raison inverse du carré de la distance de chaque source à la fente. Dans tous les cas les sources doivent être assez éloignées pour que toute la lumière qui tombe sur la fente, se retrouve dans le spectre; ce qui, en raison de l'ouverture limitée des objectifs, n'arriverait pas, si les sources étaient vues de la fente sous un angle trop grand.

En définitive ce photomètre reproduit le photomètre ordinaire, à la différence que la lumière est analysée.

3° — Photomètre de Vierordt.

Un autre procédé simple consiste à couper réellement la fente en deux et à modifier la largeur d'une des moitiés. On peut admettre que la quantité de lumière utilisée est proportionnelle à la largeur (§ 121, 3°).

Que les spectres soient alors inégalement purs, est sans importance en vertu du principe de continuité que nous appliquerons souvent : *les parties voisines du spectre produisent sur l'œil des effets identiques.*

Au surplus quand les sources sont d'intensités par trop différentes, on couvre une des moitiés de la fente d'un verre enfumé préalablement étalonné.

4° — Photomètre de Cornu.

Dans le cas où l'on veut comparer les lumières émises par deux surfaces (éclats intrinsèques), on les projette sur les moitiés de la fente au moyen de deux objectifs dont on diaphragme l'un.

C'est l'application à l'analyse spectrale de la méthode exposée au § 112.

125. Emploi de lumière polarisée.

1° — Je renvoie le lecteur à mon cours sur *les Interférences et la Diffraction* pour l'étude de la polarisation. Il suffit pour l'instant de

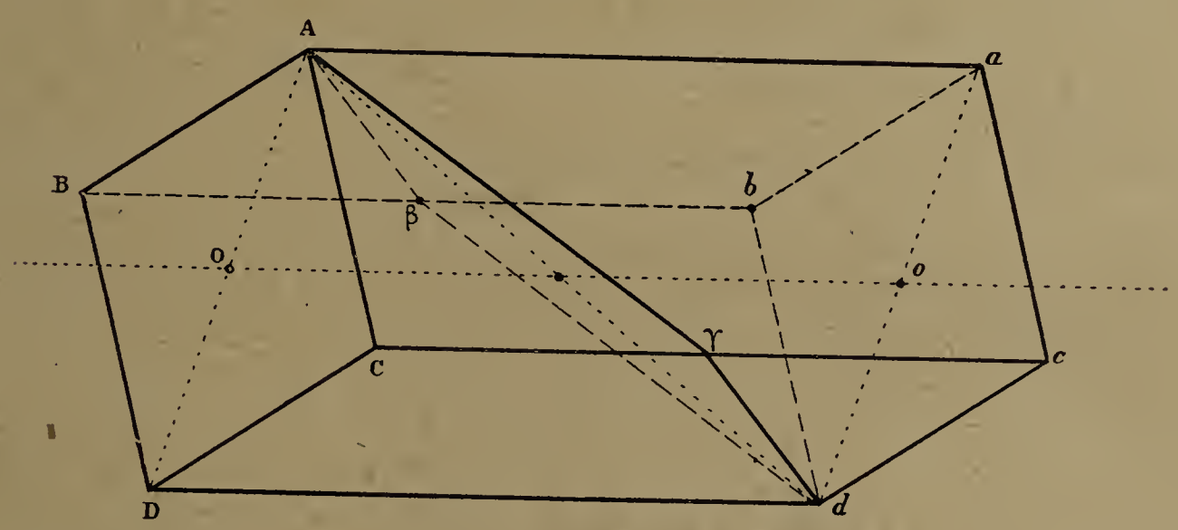


Fig. 123.

BC = Grande diagonale ; AD = Petite diagonale ; A et d = Angles obtus ; AadD = Section principale ; A$\beta d\gamma$ = Section recollée.

savoir que la lumière, après la traversée dans une direction convenable d'appareils appelés *nicols*, jouit de propriétés particulières : on dit qu'elle est *polarisée rectilignement.*

Le Nicol est un cristal de spath dont les faces sont de clivage.

Les faces opposées ABDC, *abdc* sont des losanges ; les autres faces sont des parallélogrammes dont le grand côté est un peu moins de quatre fois le petit.

On scie le cristal suivant le plan A$\beta d\gamma$ passant par les angles obtus A et d ; on recolle les morceaux avec du baume du Canada.

Dans le losange ABDC, AD est la petite diagonale, BC est la grande diagonale.

Le plan AadD qui passe par les petites diagonales (il est normal à la section A$\beta d\gamma$), s'appelle *section principale* du Nicol.

La lumière traverse le nicol dans des directions voisines des longs

côtés Aa. On dit qu'elle est polarisée perpendiculairement à la section principale; on dit encore que la vibration est dans la section principale, c'est-à-dire dans le plan passant par les petites diagonales.

Si la lumière polarisée tombe sur un second nicol, celui-ci (abstraction faite des pertes par réflexion et absorption) n'en transmet qu'une fraction :

$$i = \mathrm{I} \cos^2 \alpha;$$

α est l'angle des sections principales des Nicols.

Ceux-ci sont placés de manière que les droites centrales Oo soient parallèles et coïncident approximativement; le second nicol tourne censément autour de Oo comme axe.

Deux nicols fournissent donc le moyen de faire varier l'intensité d'un faisceau dans un rapport connu, d'un minimum I_0 à un minimum nul.

2° — D'autres appareils sont également capables de polariser la lumière.

Ainsi la lumière qui se réfléchit sur le verre sous un angle i satisfaisant à la relation $\mathrm{tg}\, i = n$ (n est l'indice de réfraction), est polarisée rectilignement dans le plan de réflexion. Par conséquent, reçue sur un Nicol dont la section principale fait l'angle α avec le plan de réflexion, elle est transmise dans le rapport $\sin^2 \alpha$. La quantité transmise est nulle quand la section principale est parallèle au plan de réflexion; elle est maxima quand ces plans sont rectangulaires.

126. Spectrophotomètres utilisant la lumière polarisée.

Parmi tous les dispositifs (ils sont nombreux) je décrirai le plus simple.

Le faisceau émis par la source de comparaison, traverse deux nicols dont on fait varier l'angle α des sections principales.

On atténue donc à volonté l'un des spectres jusqu'à amener l'égalité.

Rien n'empêche d'intervertir les faisceaux, c'est-à-dire de mettre les nicols sur le faisceau émis par la source à comparer.

Les lumières sont toujours étudiées par substitution : on ne demande à la source de comparaison que d'être invariable : on lui compare successivement l'étalon et la source à étudier.

On élimine ainsi les effets des réflexions et de l'absorption.

Supposons les nicols devant les sources à étudier. Soit α_1 et α_2 les angles des sections principales des nicols dans les deux cas; soit I_1 et I les intensités des faisceaux à comparer. Les intensités transmises sont :

$$i_1 = k\mathrm{I}_1 \cos^2 \alpha_1, \qquad i_2 = k\mathrm{I}_2 \cos^2 \alpha_2,$$

où k est un coefficient inconnu. Par hypothèse elles sont égales à l'intensité dans le spectre de comparaison, par suite égales entre elles. D'où :

$$\mathrm{I}_1 \cos^2 \alpha_1 = \mathrm{I}_2 \cos^2 \alpha_2.$$

Supposons les nicols devant la source de comparaison. On a :

$$k\mathrm{I}_1 = i \cos^2 \alpha_1, \qquad k\mathrm{I}_2 = i \cos^2 \alpha_2:$$

d'où :

$$I_1 : I_2 = \cos^2\alpha_1 : \cos^2\alpha_2.$$

On a combiné une infinité de dispositifs, la plupart sans intérêt pratique. Leur étude exige des connaissances que nous n'avons pas encore; d'autre part quand nous aurons ces connaissances, la théorie des appareils ira d'elle-même. Je n'insiste donc pas.

Photométrie hétérochrome.

127. Phénomène de Purkinje.

1° — Avant de comparer les pouvoirs éclairants des radiations simples, cherchons si cette comparaison a un sens précis : est-il possible de dire que le bleu de telle longueur d'onde éclaire *n* fois moins que le rouge de telle autre longueur d'onde, les unités étant choisies comme au § 121?

Quelle que soit la définition des *pouvoirs éclairants*, la comparaison *inconditionnée* est impossible en raison du *phénomène de Purkinje* dont voici l'énoncé : *L'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse* I *qui dépend de la longueur d'onde* λ.

Si, par exemple, on double toutes les intensités, les sensations ne varient pas dans le même rapport. Nous ne pouvons pas écrire :

$$s = s_0 f(I),$$

où $f(I)$ est la même fonction pour toutes les radiations.

Nous avons plus généralement :

$$s = s_0 f(I, \lambda).$$

2° — Voici l'expérience fondamentale établissant la réalité du phénomène de Purkinje.

Avec le photomètre à baguette décrit au § 107, fig. 101, comparons deux sources, l'une S_1 rouge, l'autre S_2 bleue. Ce sont, par exemple, des lampes à pétrole portant des verres colorés. On les dispose, tant bien que mal, de manière que les ombres paraissent également noires : soient alors d_1 et d_2 leurs distances à l'écran. Augmentons les distances dans le même rapport : la source rouge *semble* perdre de l'intensité par rapport à la bleue. Diminuons les distances dans le même rapport : la source bleue *semble* devenir moins intense que la source rouge.

Pour les faibles éclairements, l'œil est donc plus sensible aux bleus qu'aux rouges; pour les forts éclairements, il est plus sensible aux rouges qu'aux bleus.

Contrairement à ce qui précède, lorsque les sources ont même teinte, l'égalité des éclairements se maintient, quand on remplace les distances d_1 et d_2 par les distances kd_1 et kd_2, k étant un facteur quelconque.

3° — Conséquence de cette propriété de l'œil : tout éclairement faible paraît plus bleu qu'il n'est; tout éclairement intense paraît plus rouge

qu'il n'est. Le lecteur sera surpris d'apprendre que *la lumière de la lune est, d'après sa composition, plus rouge que celle du soleil*; l'expérience directe le prouve; d'ailleurs une lumière diffusée est toujours plus riche en radiations rouges que la lumière incidente.

Cependant la lumière de la lune *paraît* bleue, parce qu'elle est faible.

Réciproquement, quand on veut donner l'impression d'une lumière éclatante, on la prend rouge; quand on veut donner l'impression d'une lumière faible, on la prend bleue : procédé couramment employé au théâtre. De même lorsqu'on séjourne quelque temps dans une chambre noire éclairée par un verre rouge, on a la sensation qu'il fait dehors un beau soleil; on est déçu quand on retrouve en sortant un temps sale et gris.

128. Imprécision de la sensation de blanc (blanc subjectif).

Nous avons défini le blanc d'une manière objective. Il résulte du phénomène de Purkinje que le blanc physiologique n'est pas toujours produit par le blanc objectif. Nous venons de voir qu'un éclairement objectivement blanc qui part de zéro et croît indéfiniment, vire du bleu ou rouge. Corrélativement les peintres appellent *froids* les tons bleus, *chauds* les tons rouges.

La sensation de blanc (blanc subjectif) est donc assez mal définie; nous revenons là-dessus au § 244.

129. Relation entre le phénomène de Purkinje et la loi de Fechner.

En vertu de la loi de Fechner, entre la sensation S et l'excitation E existe la relation (§ 116) :

$$S = a \log E + b.$$

Supposons qu'elle s'applique à deux radiations simples rouge S et bleue S'. Posons les sensations égales et égales à l'unité pour les excitations conventionnellement égales à l'unité. Nous écrirons donc :

$$S = 1 + a \log E,$$
$$S' = 1 + a' \log E'.$$

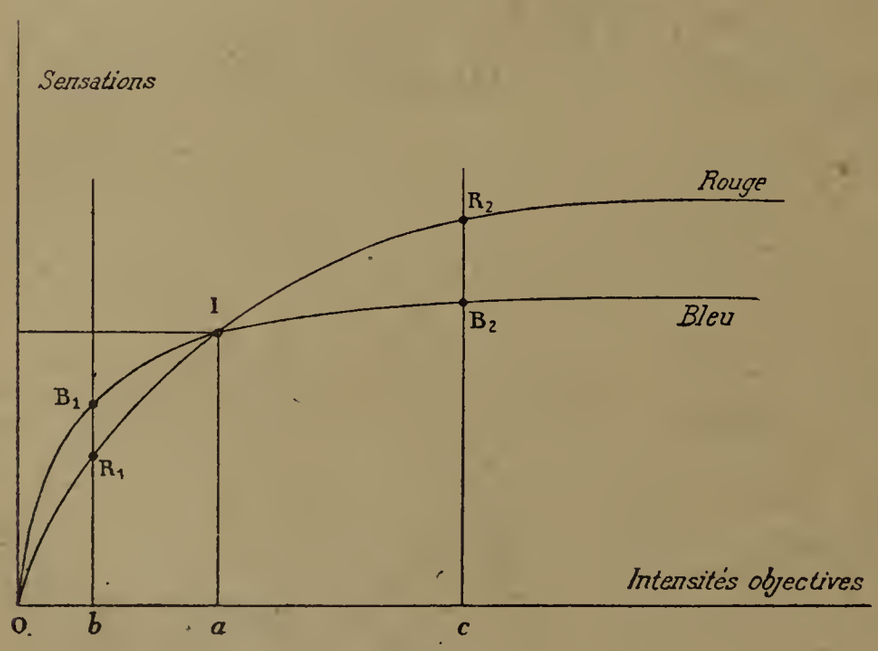


Fig. 124.

Les excitations pour lesquelles les sensations sont encore égales, sont reliées par la relation :

$$a \log E = a' \log E', \qquad \log E = \alpha \log E'.$$

Différencions : $$\frac{dE}{E} = \alpha \frac{dE'}{E'}.$$

Cette équation signifie que les sensibilités qui par hypothèse sont constantes, ne sont pas les mêmes pour les deux radiations.

En vertu du phénomène de Punkinje, a' est plus petit que a, puisque à partir de l'égalité, pour le même accroissement relatif des excitations, la sensation croît moins vite pour le bleu que pour le rouge (fig. 124).

On a donc : $$\alpha = a' : a < 1, \qquad \frac{dE}{E} < \frac{dE'}{E'}.$$

La sensibilité (mesurée par les rapports inverses) est donc plus grande pour le rouge que pour le bleu.

130. Comparaison des pouvoirs éclairants par les acuités visuelles.

1° — Voici le principe sur lequel on peut baser un mode de comparaison. *Par définition, deux faisceaux ont même pouvoir éclairant quand, éclairant un même objet, placé à la même distance de l'observateur, ils en font percevoir les détails avec la même netteté; autrement dit, quand ils ramènent l'acuité visuelle à la même valeur.*

Sur une page imprimée recevons un spectre (normal pour simplifier); diminuons l'intensité, par exemple, en prenant la fente éclairante de plus en plus étroite. Les caractères sont encore aisément lisibles dans l'orangé, le jaune, le vert, quand ils ont cessé de l'être dans les autres couleurs. Cette expérience suggère la définition précédente qui assimile le pouvoir éclairant à la propriété de faire distinguer sur un écran blanc qu'elle illumine, les détails d'un objet.

2° — La mise en œuvre de cette méthode est simple. On réalise un spectre réel et pur par un procédé quelconque; on en isole une portion qui éclaire l'objet dont on doit distinguer les détails (caractère d'imprimerie, traits parallèlles équidistants,... tracés sur du verre dépoli ou sur un corps translucide quelconque). On regarde en plaçant l'œil à une distance determinée (acuité invariable).

Par un procédé quelconque (variation de la largeur de la fente, emploi de nicols, emploi d'un diaphragme percé d'une ouverture variable,...) on modifie l'intensité.

On cherche qu'elles doivent être les intensités pour que l'acuité visuelle reste la même dans toute l'étendue du spectre.

Les expériences terminées, on ramène les résultats au spectre normal comme nous avons expliqué ou § 122.

3° — Appelons *coefficients d'égale acuité*, le facteur par lequel il faut multiplier la quantité de lumière incidente pour que l'acuité prenne la valeur qu'elle a dans la partie la plus éclairante du spectre.

Pour chaque acuité, nous obtenons une courbe telle que celle de la figure 125. Le maximum de pouvoir éclairant, le minimum (égal à 1 par

convention) du coefficient d'acuité correspondent à $\lambda = 0\mu,57$; c'est le jaune du spectre. De part et d'autre la courbe se relève pour devenir quasi verticale à l'échelle de la figure; de sorte que la partie relative aux violets, n'y entre pas.

On peut définir les *pouvoirs éclairants* comme les inverses des coeffi-

Fig. 125.

cients d'acuité. On obtient ainsi une sorte de courbe en cloché, dont le sommet arrondi correspond à $\lambda = 0\mu,57$, et qui vient assez rapidement tangenter l'axe des longueurs d'onde.

131. Courbes des coefficients d'acuité pour diverses acuités.

1° — L'objet regardé restant le même, plaçons l'œil à des distances variées; pour chaque position, la reconnaissance des détails de l'objet définit une certaine valeur de l'acuité.

Si le phénomène de Purkinje n'existait pas, l'éloignement de l'œil entraînerait, pour la vision des détails, l'augmentation dans le même rapport des intensités de toutes les parties du spectre. Autrement dit, les courbes des coefficients d'acuité ou des pouvoirs éclairants resteraient les mêmes.

Macé de Lépinay et Nicati trouvent qu'il en est ainsi pour les radiations comprises entre le rouge extrême et $\lambda = 0\mu,507$.

Au contraire, le coefficient d'égale acuité relatif aux radiations plus réfrangibles décroît régulièrement à mesure que décroît l'acuité visuelle choisie comme paramètre de la courbe considérée; c'est-à-dire, à mesure qu'on doit utiliser une intensité moindre pour distinguer l'objet dans le jaune.

C'est sous une autre forme l'énoncé du phénomène de Purkinje.

Les courbes des coefficients d'acuité pour diverses valeurs de l'acuité, courbes qui se supposent pour $\lambda > 0\mu,507$, se placent régulièrement les uns *sous* les autres à mesure que l'acuité *décroît*.

Cela revient à dire que les faibles intensités violettes produisent proportionnellement plus d'effet que les grandes.

Le phénomène de Purkinje est donc caractéristique des radiations les plus réfrangibles; il n'existe pas pour les rouges et les jaunes.

2° — Admettons la loi de Fechner pour toutes les radiations.

Écrivons-là sous la forme :

$$S = 1 + a \log E.$$

Nous prenons conventionnellement l'excitation $E = 1$, pour des sensations égales.

Les résultats précédents s'énoncent en disant que le paramètre a est le même pour les radiations rouges, jaunes et vertes; il décroît pour les radiations plus réfrangibles. Le phénomène de Purkinje est mesuré par cette décroissance.

La sensibilité photométrique de l'œil pour les différences est la même pour les radiations rouges, jaunes,... jusqu'au vert moyen; elle décroît ensuite régulièrement.

132. Comparaison des pouvoirs éclairants par le photomètre de Rumford. Coefficients d'égale clarté.

1° — Il semble impossible d'utiliser les méthodes photométriques ordinaires (qui comparent les éclats de deux plages voisines), quand on les éclaire avec des lumières simples de longueurs d'onde différentes. En prenant certaines précautions, les résultats sont pourtant assez concordants. Nous appelons *coefficients d'égale clarté*, le facteur par lequel il faut multiplier l'intensité d'une région du spectre (augmenter la quantité de lumière blanche productrice du spectre) pour obtenir la même clarté que celle de la partie la plus lumineuse; le coefficient de celle-ci est donc pris pour unité.

En raison des phénomènes de Purkinje, dans chaque série de mesures, la valeur absolue de l'intensité de la partie la plus lumineuse doit être déterminée au moyen de l'étalon Carcel.

A priori nous ne savons pas si les *coefficients d'égale clarté* se confondent avec les *coefficients d'égale acuité* (§ 131).

2° — Macé de Lépinay et Nicati emploient le photomètre de Rumford (§ 107). Mais ils réduisent beaucoup la dimension des ombres, *l'œil*

appréciant d'autant plus difficilement la couleur d'une surface que son aire est plus petite. Par cet artifice, ils rapprochent la photométrie hétérochrome de la photométrie ordinaire. La baguette n'a qu'un millimètre de diamètre; la surface éclairée simultanément par la lumière simple et par une source blanche, est de l'ordre du centimètre carré.

3° — Deux difficultés se présentent.

a) La première tient au phénomène (que nous étudierons plus loin) du *contraste simultané.* En produisant deux ombres colorées voisines, on exagère par contraste leurs couleurs : la lumière du jour paraît bleue par rapport à celle d'une bougie qui devient rouge. Il n'est donc plus nécessaire *a priori* que deux éclats bleu et rouge, égaux par rapport à du blanc, soient égaux entre eux; cela, quelle que soit la théorie admise pour le contraste, que le phénomène soit dû à une erreur de jugement, ou à une altération réelle de la perception.

C'est à l'expérience de décider.

On trouve qu'à la précision de la méthode (1 : 30), deux éclats égaux à un troisième, sont égaux entre eux.

b) La seconde difficulté provient de ce que la région centrale de la rétine est jaune : par suite, cette région est moins sensible pour le bleu. C'est ce que prouve l'expérience suivante. La tige ombrante ayant 8 millimètres de haut sur 1 de large, on obtient égalité d'un éclairement jaune et d'un éclairement bleu en plaçant l'œil à 30 centimètres de l'ombre. On rapproche l'œil : l'ombre bleue devient plus brillante. On éloigne l'œil, l'ombre bleue devient plus sombre. Dans le premier cas, on utilise de l'œil une partie plus étendue de la rétine, donc moins centrale, moins jaune, plus sensible pour le bleu. C'est l'inverse dans le second cas.

Ainsi la comparaison de deux éclairements, l'un blanc, l'autre coloré, dépend de la grandeur des images. Le coefficient d'égale clarté du bleu (celui du jaune étant plus égal à 1) augmente quand l'image rétinienne diminue, diminue quand elle augmente.

4° — Je n'insisterai pas sur les résultats dont la complexité est grande. La conclusion vraiment intéressante est que les méthodes des clartés égales et des acuités égales ne donnent pas les mêmes résultats. Les phénomènes présentent une complexité qu'il était nécessaire de signaler, mais qui enlève au détail de cette étude la majeure partie de son intérêt scientifique. En définitive les pouvoirs éclairants relatifs de deux lumières diversement colorées dépendent des intensités, des aires des surfaces regardées, des méthodes de comparaison; en dehors de quelques résultats peu nombreux, c'est pure affaire individuelle.

Si, prenant les quantités de lumières continues dans le blanc solaire comme termes de comparaison pour les diverses radiations, il est vrai que le pouvoir éclairant est maximum dans le jaune, il ne faut pas oublier que le résultat serait considérablement modifié, en comparant les radiations à égalité d'énergie : le pouvoir éclairant deviendrait

maximum pour des parties du spectre plus réfrangibles que le jaune (voir mon Cours d'*Optique Géométrique*).

Faut-il conclure que dans l'éclairage public ou privé, les sources jaunes sont supérieures? Pas le moins du monde, parce que deux questions interviennent au premier chef : le prix de revient, les effets physiologiques non lumineux que produisent les radiations. On nous donnerait pour rien de la lumière violette très intense, que nous ne serions guère avancés si elle nous inflige des conjonctivites. Il faut se garder d'un *a priorisme* qui a enfanté dans ces trente dernières années les projets d'éclairage les plus stupides et les plus néfastes.

133. Méthodes de Vierordt, de Draper (Méthodes de noyage).

1° — Méthode de Vierordt.

La méthode repose sur le principe de Bouguer (§ 116), *arbitrairement généralisé.*

Projetons un spectre réel sur un écran diffusant. Sur une certaine région de ce spectre, projetons l'image d'une petite surface rectangulaire blanche d'éclat variable à volonté. Diminuons cet éclat jusqu'à ce que les bords de la petite surface disparaisse. Soit alors e sa valeur.

Recommençons pour diverses régions du spectre; soit e', e'',... les éclats de la petite surface lors de la disparition de son image. La méthode repose sur l'hypothèse que des pouvoirs éclairants des diverses régions du spectre sont entre eux comme e, e'...

C'est le principe de Bouguer mais indûment généralisé.

L'addition d'une petite quantité de lumière blanche modifie non seulement *l'éclat* de la région du spectre qui la reçoit, mais encore la *saturation* de la teinte (§ 240).

Or le principe de Bouguer ne dit pas que l'œil juge avec une sensibilité constante des variations de la saturation. La méthode compare, si l'on veut, les pouvoirs éclairants, mais à la condition de les définir comme la propriété de *noyer* une certaine quantité de lumière blanche, ce qui est arbitraire.

2° — Méthode de Draper.

Elle est aussi contestable que la précédente. Elle consiste à mesurer la quantité d'une lumière simple qu'il faut ajouter à une quantité déterminée de blanc, pour que le blanc commence à devenir coloré.

Le pouvoir éclairant serait mesuré par l'inverse de cette quantité.

134. Papillotage.

1° — Le carton E_1 de la forme représentée par la figure 126, fait 15 tours par seconde autour de l'axe $\alpha\beta$. Il est éclairé par la source S_1. Le carton fixe E_2 est éclairé par la source S_2.

On place l'œil en O et on regarde dans le tube T.

La moitié du temps on voit E_1, l'autre moitié du temps on voit E_2.

A la vitesse de 10 à 15 tours, il y a papillotage quand les éclats des écrans, *supposés de même couleur*, sont inégaux; en particulier le papil-

lotage est intense quand on éteint la source S_1 ou la source S_2.

Si les sources sont de même couleur et à des distances aux écrans convenables (proportionnelles à la racine carrée des intensités), le papillotage disparaît évidemment.

Le principe sur lequel Rood a basé une méthode de photomètrie hété-

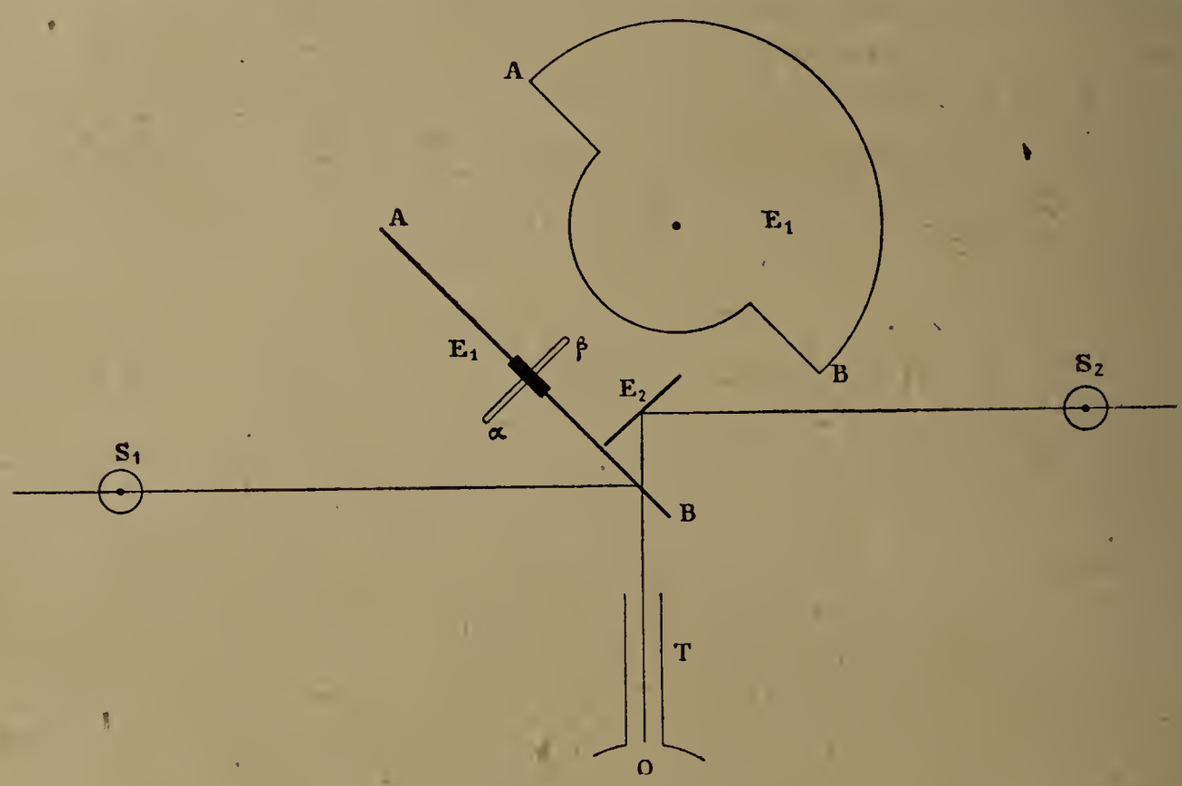


Fig. 126.

rochrome, consiste à poser que *pour une vitesse de rotation de l'ordre de 15 tours par seconde, le papillotage disparaît quand les « éclairements » sont égaux, que les sources soient ou ne soient pas de même couleur.*

En vertu de ce principe, on égalise *les éclairements* en modifiant les

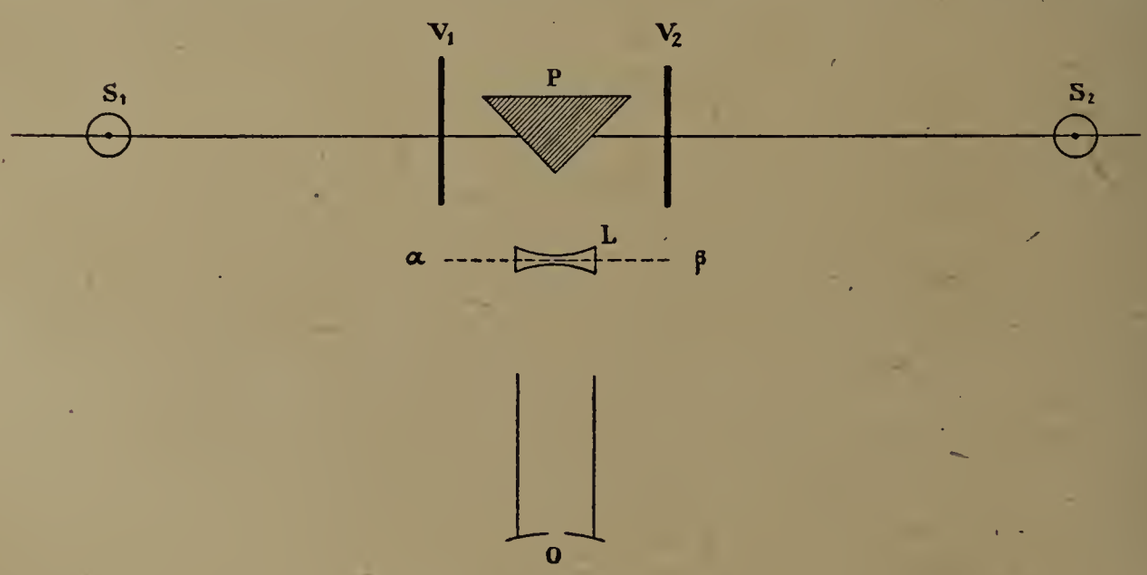


Fig. 127.

distances des sources aux écrans, de manière que le papillotage disparaisse ou soit minimum.

2° — La figure 127 représente une autre forme de l'expérience.

Elle sert à comparer les pouvoirs éclairants des verres colorés V_1 et V_2.

P est un prisme de plâtre ou de porcelaine dont les faces diffusent; L est une lentille concave qui oscille dans le sens $\alpha\beta$; elle fait environ 15 oscillations par seconde. L'œil est en O. On règle les distances des sources S_1 et S_2 de manière que le papillotage disparaisse ou soit minimum. Si les sources (lampes à incandescence) sont égales, l'expérience donne les pouvoirs éclairants relatifs des lumières après passage à travers les verres colorés (en admettant le principe qui est évidemment contestable, plus exactement qui est une définition de ce qu'on veut bien appeler *égalité des éclairements*).

Au lieu de faire osciller la lentille, on peut la supprimer et faire osciller le prisme (par exemple en le montant sur une tige de fer maintenue électriquement en mouvement, comme le battant d'une sonnerie). C'est toujours le même principe : envoyer successivement dans l'œil la lumière que diffusent deux écrans respectivement éclairés par les sources à comparer.

3° — Photomètre Simmance et Abady.

Au lieu de faire osciller le prisme, ces auteurs imposent au corps diffusant une forme particulière qui donne le même résultat.

Deux cônes C_1, C_2 dont l'angle au sommet est droit, ont leurs axes parallèles. Les cônes se coupent suivant la courbe AB. Le corps diffusant est constitué par une lame limitée par deux plans normaux aux axes des cônes et, de part et d'autre de AB, par les surfaces des cônes. Ce corps tourne autour d'une droite OO également distante des axes des cônes.

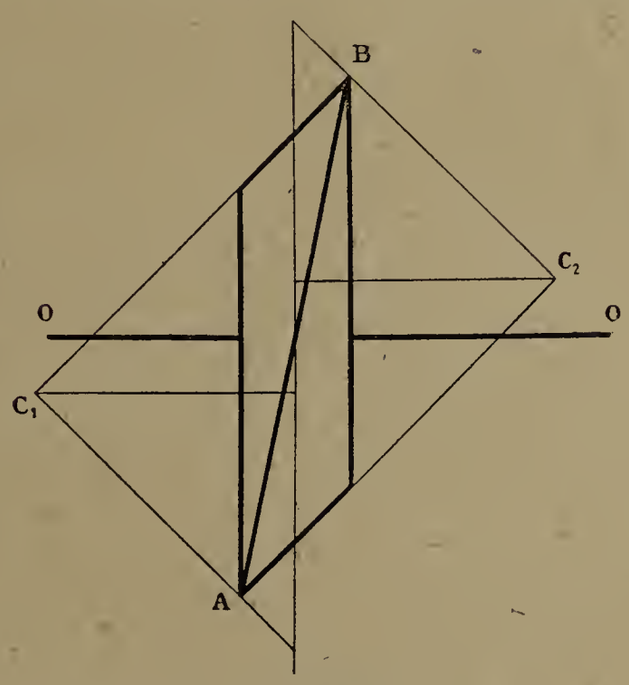


Fig. 128.

Les sources S_1 et S_2 sont sur la droite OO, à des distances grandes vis-à-vis du diamètre moyen du corps diffusant. Il est clair que l'œil placé sur la verticale du centre, dans le plan de la figure et en haut, voit une surface diffusante uniquement éclairée par la source S_1. Après rotation de 180° la surface diffusante est éclairée uniquement par la source S_2.

On passe d'une manière continue de l'un de ces cas extrêmes à l'autre.

Pour ingénieuse que soit la méthode du papillotage, on ne sait pas si ses résultats ont quelque rapport avec ceux des autres méthodes, qui du reste concordent fort mal.

CHAPITRE III

ÉCLAIRAGE

Je vais décrire les principaux modes d'éclairage, en laissant de côté les éclairages électriques que j'étudie dans les volumes II et III de mon Cours d'Électricité. Je trouve inexcusable de pérorer sur la photométrie sans savoir ce qu'est une lampe Carcel et une lampe modérateur. Les professeurs ont, il est vrai, comme excuse qu'un physicien français aurait cru déroger en décrivant dans un ouvrage de science des appareils à ce point usuels, avant que j'eusse osé cette réforme sensationnelle.

135. Chandelles et cierges.

1° — Chandelles de suif.

Une *chandelle* est un cylindre de *suif* (graisse de bœuf ou de mouton) pourvu d'une mèche axiale de coton. Le boucher livre la graisse *en branches*, c'est-à-dire adhérente aux membranes. On divise ces branches en fragments qu'on jette dans une chaudière de fonte ou de cuivre chauffée à feu nu. Quand le suif est fondu, on le verse sur une écumoire qui retient les matières solides. Tel est le procédé le plus ancien.

Le principal perfectionnement consiste à fondre en autoclave vers 110°, dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Les membranes se dissolvent ; le suif se sépare et forme une couche à la partie supérieure. On le décante au moyen d'un robinet latéral; on fait refroidir dans des cuves en bois doublées de plomb.

Moulage des chandelles.

On fait les moules à chandelles en un alliage de plomb (2 parties) et d'étain (1 partie). La portion cylindrique du moule, polie à l'intérieur, est coiffée d'un chapeau plus ou moins conique, formant entonnoir, ou d'une plaque percée, destinés à tenir l'extrémité supérieure de la mèche.

Les mèches sont en coton, sans nœud, ni brin cassé, ni corps étrangers qui feraient couler la chandelle. Un nœud arrête la mèche dans le chapeau; elle est maintenue tendue par un petit taquet de bois qui passe dans un trou percé à la base du moule (fig. 129).

On enfile les moules dans une forte planche horizontale; on les remplit de suif porté à une température convenable. Trop chaud il adhère au moule, trop froid il donne une chandelle non homogène. Quand le suif

est refroidi, on démoule en tirant sur le chapeau. Un appareil permet de remplir une douzaine de moules d'un coup : c'est un demi-cylindre portant 12 trous à sa base qui se placent devant les 12 moules et qu'on débouche et rebouche simultanément.

Fig. 129.

Le grand inconvénient des chandelles est le point de fusion très bas du suif (33°).

2° — Cierges et bougies de cire.

La *cire* est préférable au suif parce qu'elle est dure et ne fond que vers 65°; mais elle est chère.

Au sortir des ruches la cire est jaune, verte ou noire.

On l'utilise parfois telle quelle; ordinairement on la blanchit par l'action de l'air et de la lumière.

On la fond, on la coule et on la débite en rubans minces, ce qui augmente la surface et accélère le blanchiment. Pour cela, on l'amène fondue dans une auge percée à sa base d'une file de trous de 2 mm. de diamètre; elle s'écoule dans de l'eau froide sur un cylindre de bois en rotation.

On expose les rubans sur des toiles à l'air et au soleil; on les remue de temps en temps. Ils se décolorent peu à peu. On doit renouveler plusieurs fois l'opération de fonte et de rubanage pour blanchir toute la masse.

Le moulage se fait comme pour les chandelles, parfois avec des moules de verre.

On fabriquait autrefois des bougies moins fusibles avec du suif mêlé de cire, ou enrobé dans un revêtement de cire. Dans ce dernier cas, avant de couler le suif, on verse dans le moule un peu de cire fondue et on le roule horizontalement, ce qui l'enduit d'une couche régulière.

Le mot *bougie* vient de la ville algérienne de Bougie qui exportait beaucoup de cire (utilité évidente des étymologies).

136. **Bougies stéariques.**

1° — Les graisses sont des éthers sels du trialcool glycérine et de divers acides. Les savons sont les sels de ces acides.

Voici les noms des principales espèces chimiques formant les graisses, ceux des acides correspondants; je donne à côté les points de fusion.

Stéarine (61°)	Margarine (47°)	Palmitine (50°)	Oléine (au-dessous de (0°)
Acides stéarique (69°)	margarique (60°)	palmitique (62°)	oléique (14°)

Ainsi les acides sont moins fusibles que les graisses dont ils dérivent.

Comme exemple, je rappelle un des procédés de saponification. Dans une cuve en bois doublée de plomb, on introduit de 8 à 10 tonnes de suif; on recouvre d'eau, on chauffe en amenant de la vapeur. On ajoute 15 p. 100 de chaux. La saponification se produit; par refroidissement

on obtient un savon dur baigné dans une solution de glycérine qu'on vidange.

Pour décomposer le savon calcaire par l'acide sulfurique, on ajoute de l'acide étendu qu'on chauffe à la vapeur : le sulfate de chaux se précipite, les acides gras surnagent. On les lave, on les coule en pains.

La séparation des acides solides et liquides s'effectue par pression à froid, puis à chaud.

Certains agents dédoublent directement les graisses en glycérine et acides gras; entre autres, l'acide sulfurique assez concentré et à température assez élevée, l'eau sous pression à 120°. Je n'insiste pas.

2° — La fabrication des bougies est analogue à celle des chandelles, mais la mèche diffère.

La mèche des chandelles, *en coton tordu*, est généralement formée de neuf fils relativement espacés; elle nécessite le mouchage et amène toujours une trop grande quantité de matières à la combustion, d'où une flamme toujours fuligineuse.

La mèche des bougies *en coton natté*, est formé de trois brins. Pour éviter les résidus charbonneux qui feraient couler la bougie, on imprègne la mèche d'acide borique ou phosphorique qui forme avec les cendres un borate ou un phosphate fusible.

137. **Flamme de la bougie.**

1° — Bien que les corps constituant les chandelles et les bougies soient solides à la température ordinaire, comme ils fondent au voisinage de la flamme, la mèche trempe dans une coupe remplie de liquide : nous sommes ramenés au problème de la combustion d'un liquide, problème que nous retrouverons pour les lampes à huile et à pétrole. Du reste dans les *veilleuses* ordinaires, la mèche très courte M trempe directement dans l'huile; elle est supportée par un petit flotteur en liège LL revêtu à sa partie supérieure d'une plaque métallique PP (fig. 130).

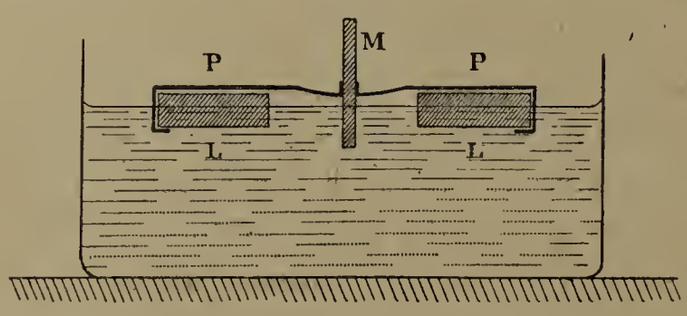


Fig. 130

On fabrique des veilleuses en acide stéarique.

Le liquide (suif ou acide stéarique fondus, huile,.....) monte par capillarité *entre les fils* de la mèche, s'échauffe et se décompose : d'où production de vapeurs combustibles.

Pour qu'il y ait flamme, il faut des vapeurs combustibles; mais qui dit flamme ne dit pas lumière : qu'on se rappelle la flamme non éclairante de l'hydrogène. Pour qu'il y ait flamme *lumineuse*, il faut une réaction chimique portant à la haute température des corps *solides* qui deviennent incandescents.

On constate dans la flamme quatre régions principales (fig. 131). D'abord un cône intérieur *obscur* A, effilé à sa partie supérieure, renfermant les produits de distillation et de décomposition du liquide combustible. La combustion y est à peine commencée et la température relativement basse : ce qu'on vérifie en y introduisant un très petit morceau de papier.

A la base de la partie obscure, en D, se trouve une partie *bleue*, peu éclairante, où la combustion est à peu près complète; il y a excès d'oxygène appelé par le tirage même de la flamme.

Au-dessus et latéralement, en B, se trouve le cône *lumineux*. La température est assez élevée pour que le charbon soit porté à l'incandescence avant de brûler. L'éclat est moins vif vers l'extérieur, parce que le carbone incandescent y est en moins grande quantité. La température est maxima quelque part entre la pointe du cône A et celle du cône B.

Fig. 131.

Enfin on distingue une quatrième région C où la combustion n'est pas très intense; il s'y fait du noir de fumée quand la flamme est fuligineuse (§ 196). L'arrivée de l'oxygène y est gênée par la flamme même qui sert d'obstacle.

2° — Les flammes ont toutes à peu près même constitution. La flamme d'une lampe à huile à double courant d'air est assimilable à la flamme d'une bougie qu'on aurait aplatie et enroulée en cylindre.

Un corps en brûlant éclaire ou n'éclaire pas suivant la manière dont se fait la combustion. Si les corps où l'hydrogène domine (H, CH^4), ont des flammes toujours peu éclairantes, ceux où le carbone domine (C^2H^2, C^6H^6), ont des flammes fuligineuses quand la surface d'arrivée de l'air est insuffisante, mais qui peuvent devenir éclatantes si cette surface est convenable. Nous verrons par exemple qu'on est amené à chasser l'acétylène par des trous extrêmement fins sous une pression relativement élevée (10 à 30 centimètres d'eau) : ce qui donne à la flamme une grande surface relativement à la quantité de gaz brûlée par seconde.

Dans le cas de la bougie, le diamètre de la mèche intervient. Si on l'augmente inconsidérément, on obtient une flamme fumeuse. Pour rendre fuligineuse la flamme d'une lampe à pétrole, il suffit d'amener un excès de matière à brûler, c'est-à-dire de faire dépasser la mèche au-dessus du bec.

Dans des conditions déterminées, on rend éclairante une flamme qui ne l'est pas, en la chargeant d'un hydrocarbure riche en carbone; par exemple, on fait barboter de l'hydrogène dans de la benzine. L'essence de térébenthine brûle mal; un mélange d'essence et l'alcool brûle avec flamme très éclairante.

Ces considérations expliquent comment le succès d'un mode d'éclai-

rage dépend essentiellement de sa mise en pratique; des tâtonnements très longs ont été nécessaires pour amener l'éclairage à sa perfection actuelle.

138. **Bougie étalon.**

On adopte comme unité commerciale la *bougie décimale.*

Par définition on a : 1 violle = 20 bougies décimales.

Rappelons que le violle est la quantité de lumière émise normalement par 1 centimètre carré de platine fondu, à la température de solidification.

La bougie décimale vaut 0,104 carcel (voir plus loin).

Le violle vaut donc 2,08 carcel.

Ceci posé, l'intensité horizontale des bougies *réelles* vaut à peu près 0,014 carcel par gramme de matière brûlée à l'heure. Les quantités brûlées à l'heure varient de 7 à 10 grammes, suivant les bougies; les intensités horizontales vont de 0,10 à 0,14 carcel. Il faut de 7 à 10 bougies pour faire un carcel (dans la direction horizontale s'entend).

Le nombre moyen 0,014 carcel par gramme de matière brûlée à l'heure est exact aux erreurs d'expérience près, quelles que soient la composition de la bougie et la nature de sa mèche.

Rappelons que suivant leur longueur, les bougies pèsent de 50 à 100 grammes; il y en a de 5 à 10 au paquet d'une livre (500 grammes).

139. **Lampe à l'huile.**

Dans la lampe à l'huile il faut considérer deux parties : le bec où l'huile brûle, le mécanisme qui amène l'huile.

1° — Bec.

Il se compose d'un tube annulaire T fermé à sa partie inférieure, dans lequel se trouve la mèche plongeant dans l'huile. Autour de la paroi extérieure du tube entre à frottement dur un double tube A qui supporte le verre V et permet de placer son rétrécissement plus ou moins haut par rapport à la flamme. L'espace entre les tubes A est libre, sauf aux endroits des entretoises qui maintiennent les tubes A solidaires.

La mèche est enroulée autour d'un bout de tube porte-mèche B supporté par une crémaillère C logée dans un tube τ soudé à la base du tube T; on la manœuvre avec un pignon P.

Trois lames métalliques flexibles G sont fixées par leurs extrémités au tube porte-mèche. Leurs extrémités supérieures dentelées et recourbées forment des griffes. On amène le tube B au-dessus du tube T; on insère la mèche entre le tube B et les griffes; lorsque avec la crémaillère on abaisse le tube, les griffes se rapprochent et saisissent la mèche.

L'huile est amenée en excès par le tube t; elle refroidit le tube T; une partie brûle sans carboniser la mèche; l'excès retombe extérieurement au tube T dans le réservoir inférieur, abstraction faite du peu qui revient par le tube τ.

Ce système est dit *à double courant d'air*, l'air arrivant librement des deux côtés de la mèche. La combustion est activée par l'appel d'air que produit le tube de verre. L'expérience montre qu'un verre rétréci (*coudé*) est favorable à une bonne combustion ; le rétrécissement est au niveau de la flamme : sa position est du reste réglable.

Les fils de coton dont se compose la mèche, laissent entre eux des intervalles assez petits pour que le liquide y monte par capillarité, comme entre deux fils métalliques parallèles. Le tissu ne doit être ni trop lâche, ni trop serré. Trop lâche, il donne lieu à des espaces capillaires d'une trop grande section droite : l'huile s'élève peu et mal. Trop serré, il arrête l'huile, les espaces capillaires se trouvant interrompus par les croisements

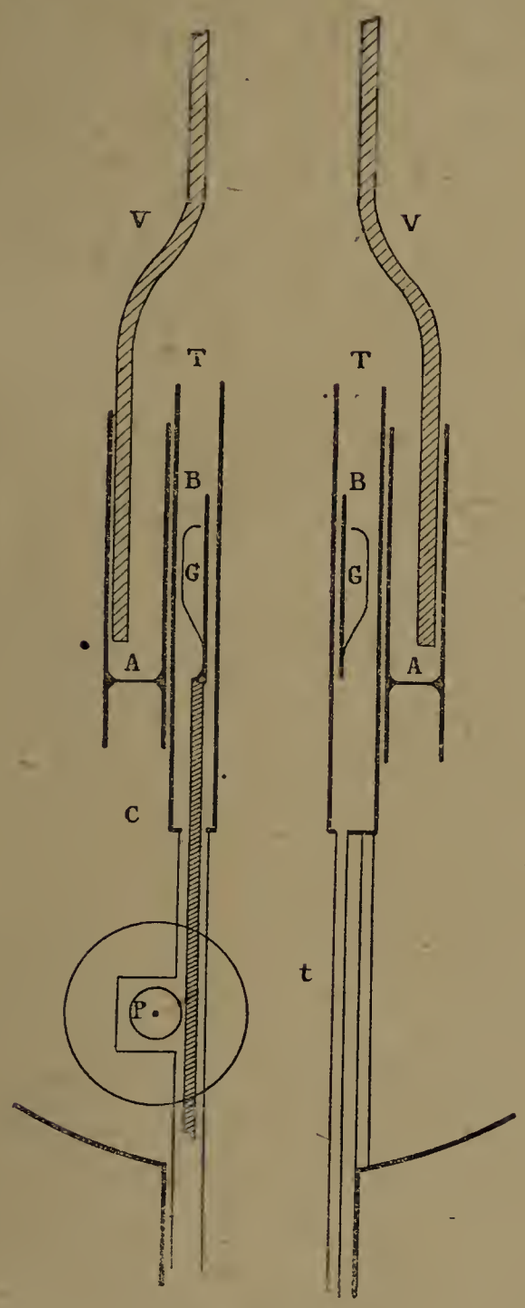


Fig. 132.

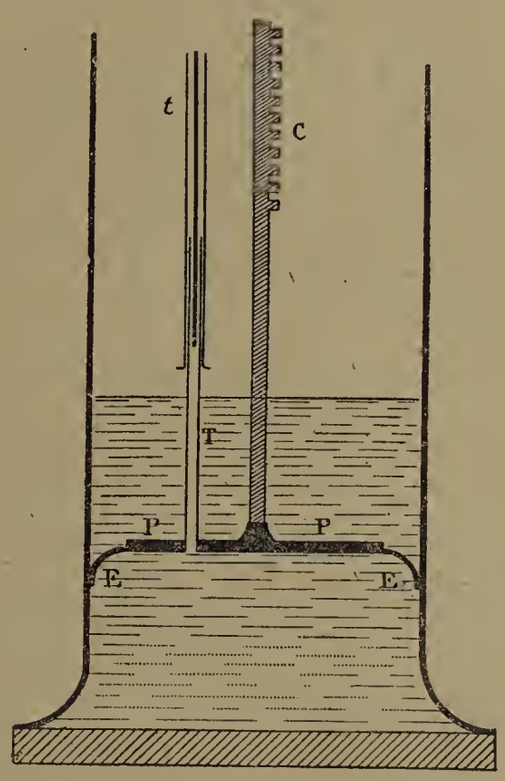


Fig. 133.

des fils. En principe la mèche ne doit pas brûler; effectivement son usure est minime si l'alimentation est convenable. Quand elle est insuffisante, la mèche *charbonne*. On peut remplacer les mèches de coton par des mèches d'amiante qui ne s'usent pas.

2° — Procédés pour amener l'huile.

Je décrirai les plus importants.

a) Lampe a modérateur.

Le réservoir d'huile est un cylindre qui constitue le pied de la lampe

Dans ce cylindre se meut un piston formé d'une plaque métallique PP et d'un cuir embouti EE que la pression de l'huile applique contre le cylindre. Grâce à ce cuir, le piston sert en même temps de soupape.

Un ressort à boudin de tapissier (tel qu'on en trouve dans les sommiers ; il n'est pas représenté) pousse le piston vers le bas. On élève le piston, *on monte la lampe*, au moyen d'une tige à crémaillère C fixée au milieu de la plaque PP et sur laquelle on agit avec un pignon (non représenté).

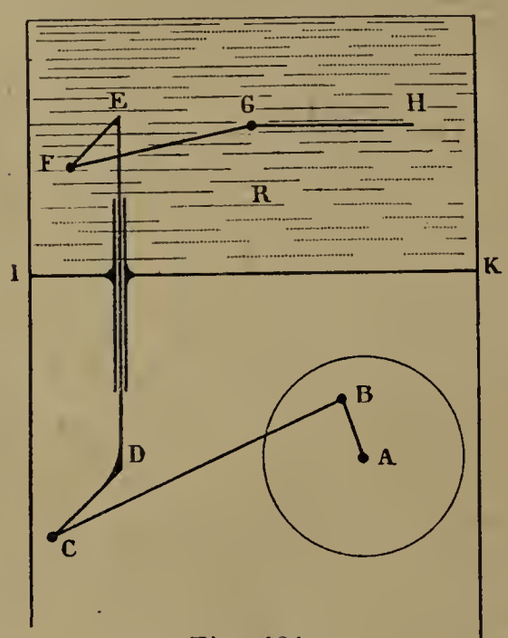


Fig. 134.

La partie vraiment curieuse de l'appareil est le modérateur.

Au piston est fixé un tube T qui entre à frottement doux dans le tube *t* d'alimentation (voir fig. 132); le piston chasse l'huile dans les tubes *t* et T, et de là sur la mèche. Si le mécanisme ne se composait que de ces deux tubes, l'alimentation serait irrégulière, parce que la hauteur à laquelle l'huile doit s'élever, augmente à mesure que le ressort se détend. Il faut donc créer une résistance supplémentaire *qui diminue quand le piston s'abaisse : c'est l'office du modérateur.*

Le modérateur est une aiguille à tricoter fixe dans l'axe du tube *t* et qui ne laisse qu'un étroit passage à l'huile dans la partie du tube T qu'elle occupe. Mais précisément la longueur de cette partie diminue quand le piston s'abaisse. Par tâtonnement on donne au modérateur un diamètre et une longueur telles que l'alimentation soit régulière.

Pour *monter* la lampe, on agit sur le pignon. On soulève le piston ce qui bande le ressort; l'huile écarte le cuir embouti et passe sous le piston. Quand on abandonne le pignon, la pression de l'huile rend étanche la fermeture de l'espace qui se trouve sous le piston.

b) Lampe Carcel.

On ne l'utilise plus dans l'éclairage; elle n'en reste pas moins classique par son importance historique et son rôle en photométrie (c'est pour cela qu'on ne la décrit jamais).

La figure 134 représente schématiquement le mécanisme.

Un mouvement d'horlogerie (c'est-à-dire un train d'engrenages mû par un large ressort spiral et réglé par une roue à ailettes) fait tourner un arbre coudé AB qui impose à une bielle BC un mouvement alternatif. La bielle est articulée sur un levier DC normal à un arbre DE qui par suite est animé d'un mouvement alternatif de rotation. L'arbre passe à frottement doux dans un tube soudé normalement dans la paroi inférieure IK du réservoir à huile.

En définitive le mouvement d'horlogerie placé dans l'air entretient

au sein de l'huile le mouvement alternatif de rotation d'un arbre DE.

Un levier EF, fixé normalement sur cet arbre, est articulé à l'extrémité de la tige GH du piston d'une petite pompe que la figure 135 représente schématiquement.

Cette pompe immergée dans l'huile est aspirante, foulante et à double effet. Elle prend l'huile dans le réservoir R et la refoule dans le tube d'alimentation *t*. Le piston, de 6 millimètres de diamètre, a environ 6 millimètres de course; il accomplit une période en 7 secondes environ. Les soupapes très légères sont maintenues par des ressorts filiformes. Le piston envoie donc dans le tube d'alimentation environ 0cm,34 d'huile toutes les 7 secondes, soit un débit de 174 centimètres cubes à l'heure.

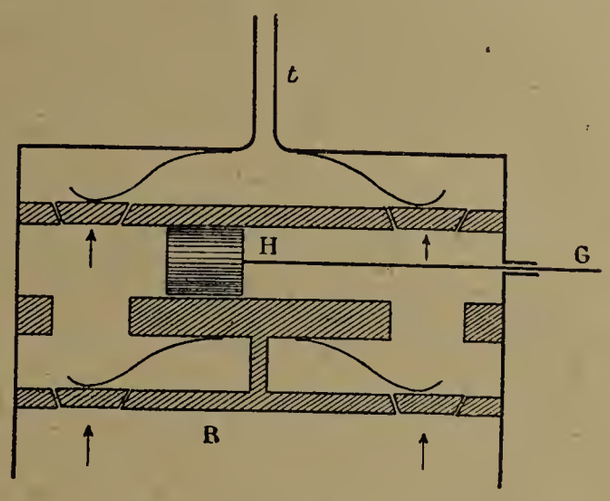


Fig. 135.

Comme la lampe *normale* Carcel doit brûler 42 grammes à l'heure d'huile de colza, soit environ 46 centimètres cubes (la densité de l'huile de colza est 0,913), il y a grand excès d'alimentation; d'où refroidissement du tube et combustion de l'huile avec mèche *à blanc*.

L'excès d'huile retombe dans le réservoir R.

c) Lampe Gagneau.

La pompe Carcel est d'une construction délicate; on a cherché à en simplifier la construction (fig. 136).

Dans la lampe Gagneau, les corps de pompe et les pistons sont remplacés par deux tambours TT de fer blanc, dont les fonds flexibles sont en taffetas gommé ou caoutchouté. Les soupapes S et *s* sont des petits morceaux de taffetas. La pompe fonctionne grâce au mouvement oscillatoire du balancier B obtenu par la rotation d'une roue dentée formant came, sur le pourtour de laquelle repose le nez N.

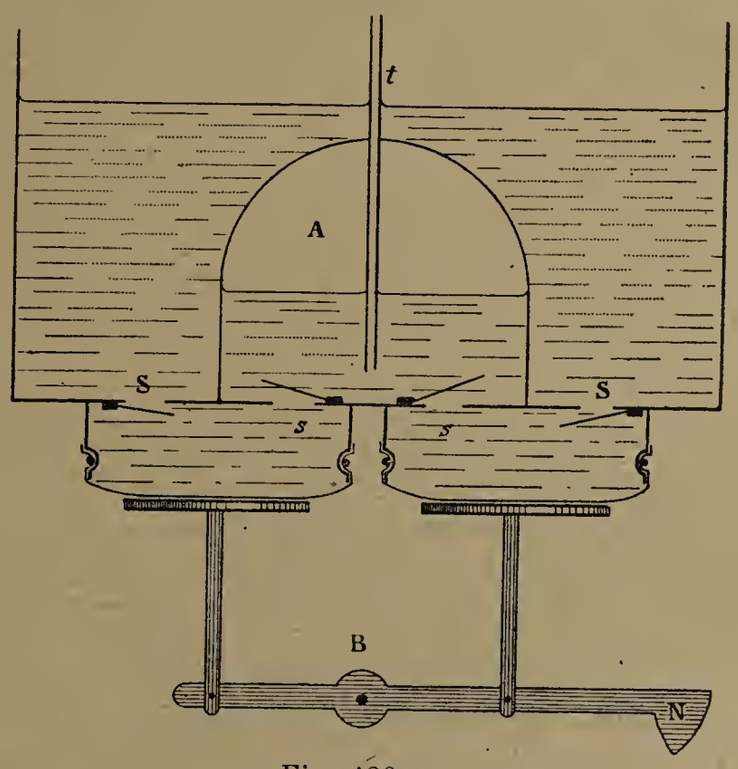


Fig. 136.

Pour rendre régulier l'écoulement de l'huile en A est un matelas d'air comme dans les pompes à incendie.

140. Etalon Carcel.

L'étalon Carcel est l'intensité *horizontale* d'une lampe Carcel (on peut la remplacer sans inconvénient par une lampe modérateur) brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée.

On la règle *censément* comme suit.

Le bec a 2 cm. 35 de diamètre extérieur, 1 cm. 70 de diamètre intérieur.

Le diamètre du courant d'air est 4 cm. 55; etc.

La mèche doit peser $3^{gr},6$ par décimètre, être formée de 75 brins, etc.

Le verre a 27 centimètres de hauteur; la distance du coude à la base est 6 cm. 1, etc.

On règle la dépense en élevant la mèche au-dessus du bec et en déplaçant le verre.

Je passe d'autres articles du règlement aussi stupides dans leur candeur.

Quand on a fait dans sa vie une seule expérience, on n'ignore pas que des conditions aussi minutieuses sont irréalisables. En fait et pour ne pas mettre de la précision uniquement sur le papier, l'étalon Carcel est une lampe modérateur dont le diamètre moyen de la mèche est 2 centimètres, qui porte un verre coudé et qu'on règle au petit bonheur de manière qu'elle brûle 42 grammes d'huile à l'heure.

C'est à se rouler quand on voit nos braves idiots ajouter que pour le fonctionnement normal de l'étalon Carcel, la pression atmosphérique doit être de 76 centimètres et l'air contenir 10 litres de vapeur d'eau par mètre cube d'air sec!

Dans les usines à gaz, la lampe est placée sur une balance de Roberval; on règle la dépense en agissant sur la mèche qu'on sort plus ou moins. Elle dépasse généralement le bec de 7 millimètres.

Pour des dépenses comprises entre 42 ± 4 grammes, il y a proportionnalité entre l'intensité lumineuse et la dépense en huile.

141. Lampe à pétrole.

1° — Les lampes à pétrole sont plus simples que les lampes à huile comme conséquence de la facilité avec laquelle le pétrole monte dans la mèche. Il suffit que la mèche plonge dans le pétrole et que le niveau de celui-ci ne soit pas trop au-dessous du plan où se fait la combustion, pour que l'alimentation soit régulière par simple capillarité.

Dans les lampes à huile, la mèche dépasse le bec de plusieurs millimètres. Dans les lampes à pétrole où il n'est pas nécessaire que le combustible soit d'abord échauffé, la mèche reste au ras du bec; sinon la lampe fume par excès de vapeurs produites et insuffisance d'air.

De là résulte que la mèche s'use très peu et n'a jamais besoin d'être coupée. Il suffit de frotter le bord supérieur pour faire tomber la petite couche charbonnée.

2° — La figure 137 représente le schéma à *mèche plate*.

La mèche plonge dans le pétrole et passe dans un tube aplati T. On

règle la hauteur au-dessus de l'extrémité supérieure de ce tube au moyen du bouton B; il actionne le pignon à dents aiguës P qui entre à moitié dans le tube T.

Au-dessus de la mèche est un chapeau hémisphérique coupé d'une fente par où sort la flamme. Le tirage est augmenté par un verre V bombé à sa partie inférieure. L'air pénètre par des trous *t*; il est forcé de lécher la flamme en raison de la disposition de l'orifice percé dans le chapeau.

3° — Dans les becs à flamme circulaire, la nécessité de donner à la

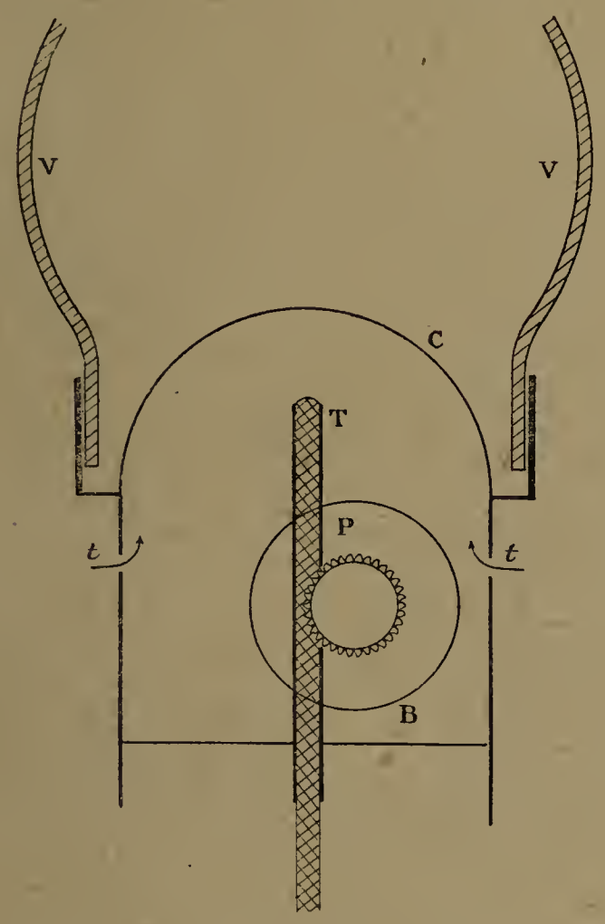


Fig. 137.

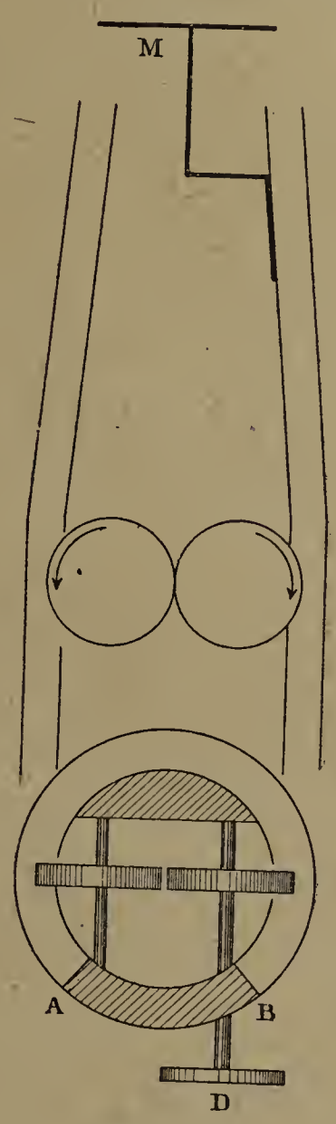


Fig. 138.

mèche une grande longueur (de manière qu'elle plonge dans le réservoir à pétrole) conduit à utiliser encore une mèche plate très large. Sa largeur est calculée de manière qu'enroulée elle remplisse exactement l'extrémité supérieure du tube annulaire destiné à la recevoir et qui est formé de deux tubes troncs coniques coaxiaux.

Il résulte de là qu'à sa base la mèche laisse entre les tubes une partie libre AB, ce qui permet la réunion rigide des tubes coaxiaux formant le tube annulaire, et le passage d'un axe actionnant deux pignons dentés engrenant l'un avec l'autre et agissant bien symétriquement pour élever ou abaisser la mèche; le bouton extérieur D agit sur l'un des pignons.

C est ce que représente schématiquement la figure 138.

Parfois un mince disque métallique M force la flamme à prendre la forme d'une portion de sphère, ce qui assure une combustion complète.

4° — La figure 139 représente le schéma d'une lampe à courant d'air central.

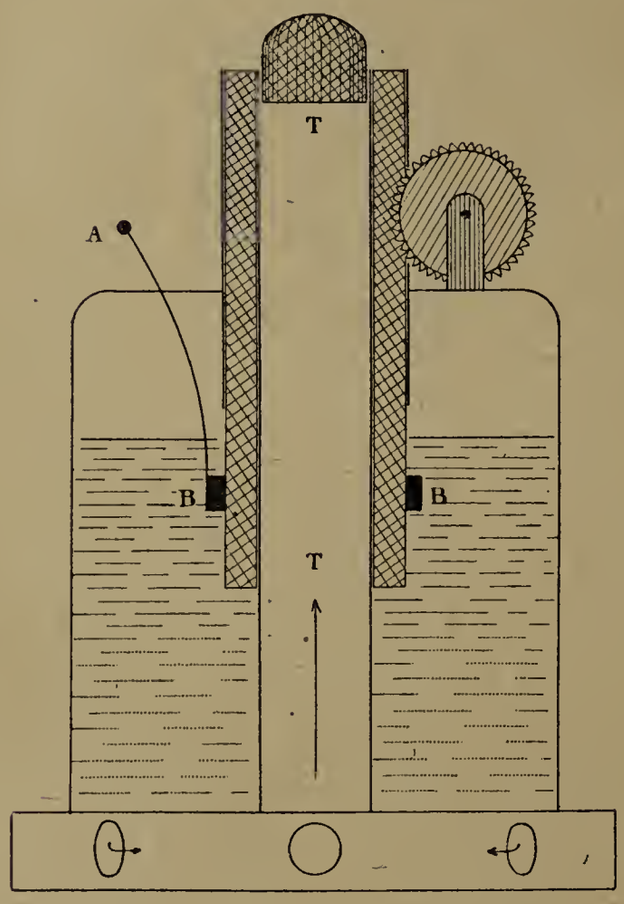


Fig. 139.

Dans la lampe ordinaire à mèche ronde, on est forcé d'employer un bec conique et une mèche plate enroulée, par impossibilité de soutenir le tube central *sans le souder au fond du réservoir* : tout soutien latéral empêcherait la mèche cylindrique de passer. Précisément dans la lampe *à courant d'air central*, le tube autour duquel s'enroule la mèche, est fixé au fond du réservoir; d'où emploi d'une mèche cylindrique et prise d'air par le bas. Le sommet du tube central est formé par une toile métallique.

L'avantage de ce système est un refroidissement énergique du tube T, par suite une sécurité, une régularité plus grandes, et la possibilité d'emploi d'huiles plus légères.

On supprime ordinairement le pignon ; on règle alors la mèche en hauteur par une tige A soudée à un collier de laiton BB entourant la mèche.

142. Définition du pétrole lampant.

Le pétrole brut est divisé par distillation en trois parties principales qui passent au-dessous de 150° (*essences*), entre 150° et 300° (*huiles lampantes*), au-dessus de 300° (*huiles lourdes*).

Légalement en France les huiles lampantes ne doivent pas s'enflammer au-dessous de 35°. On vérifiera que le pétrole placé *froid* dans une capsule, ne prend pas feu quand on projette une allumette enflammée dans la capsule. Si le pétrole est *lampant*, il ne doit prendre feu que porté à la température de 35°

On conçoit que la propriété d'un liquide froid de s'enflammer à sa surface libre, soit intimement liée à la quantité de vapeurs que produit par seconde l'évaporation à la température de l'expérience, par suite dépend du point d'ébullition. L'essai par inflammation a sur l'essai par ébullition l'avantage pratique de fournir une donnée expérimentale dans des conditions analogues à celles d'emploi.

Si le pétrole est inflammable à trop basse température, c'est-à-dire trop volatil, il peut arriver que la lampe explose.

143. Lampe Hefner. Étalon Vernon-Harcourt.

1° — Lampe Hefner.

C'est une lampe à acétate d'amyle qui ressemble à une petite lampe à essence (fig. 140).

Le tube a 8 millimètres de diamètre sur 35 millimètres de hauteur; il contient une mèche ronde en coton tressé. La flamme se produit à l'air libre; il faut lui donner une hauteur $h = 40$ millimètres, ce qu'on fait en le projetant au moyen d'une lentille L sur un écran dépoli gradué E.

L'Hefner vaut 0,093 carcel. La formule de correction au voisinage de $h = 40^{mm}$ est :

$$I = 1 + 0{,}027\,(h - 40).$$

La flamme est très mobile; on se demande avec stupeur à quoi servent des formules de correction portant sur la pression atmosphérique et l'humidité de l'air : cela me paraît idiot. Il est vrai qu'avec joie je ne me reconnais pas la mentalité d'un savantasse.

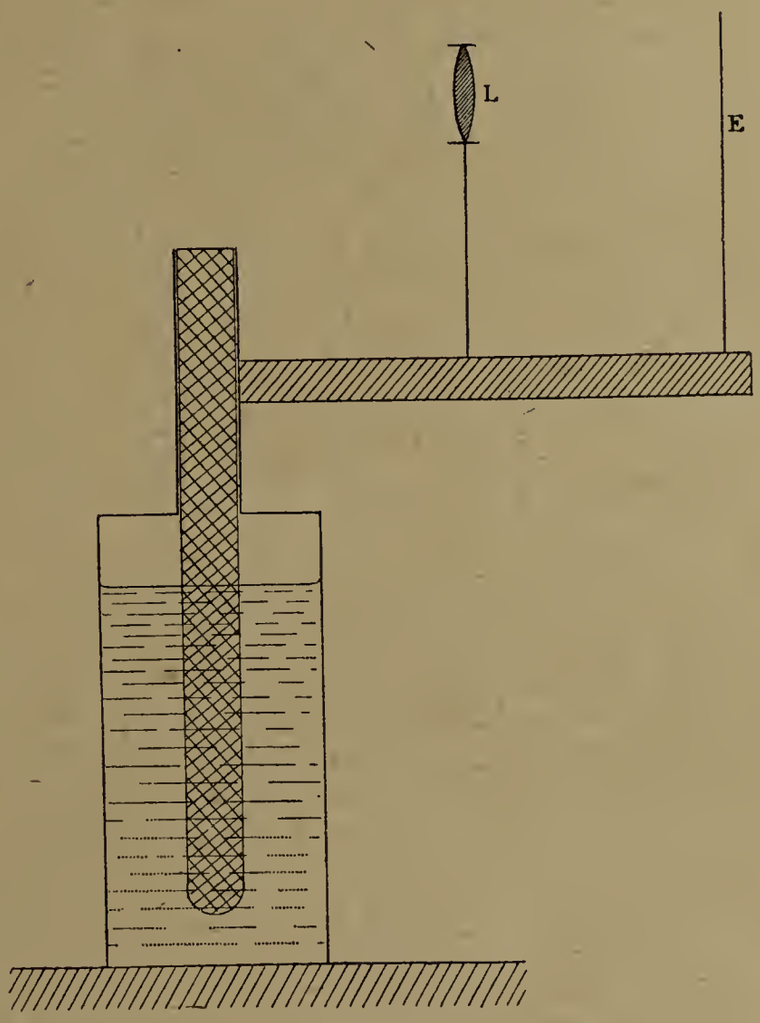


Fig. 140.

2° — Lampe Vernon-Harcourt.

La lampe à pentane se fabrique avec et sans mèche.

Je n'insiste pas sur des détails techniques sans intérêt éducatif. Quand on veut se servir de tels appareils, on lit la notice qui les accompagne. Je conseille seulement de rabattre sur la précision annoncée.

144. Becs à gaz.

Ils se ramènent à deux types, le *bec papillon* et le *bec circulaire*.

1° — Bec papillon.

Le *bec papillon* est à un seul jet plat (fig. 141).

La fente a $0^{mm},7$ de large. Le diamètre du bouton (par suite la longueur de la fente) varie avec la consommation. Quand on passe de

120 litres à 250 litres à l'heure, le diamètre croît de 6 à 9 millimètres. La flamme est sensiblement un demi-cercle qui a le milieu de la fente pour centre. Elle est frangée sur le diamètre horizontal supérieur.

Ce bec est utilisé dans les laboratoires pour le travail du verre, à cause de la grande longueur de tube qu'il peut chauffer simultanément.

2° — Bec circulaire.

Le *bec circulaire* Bengel est représenté dans la figure 142.

Le gaz arrive par le tube T, se divise entre les deux tubes *t*, et parvient ainsi dans un tube annulaire CC d'où il s'échappe par une cinquantaine de petits trous O, rangés circulairement.

Fig. 141.

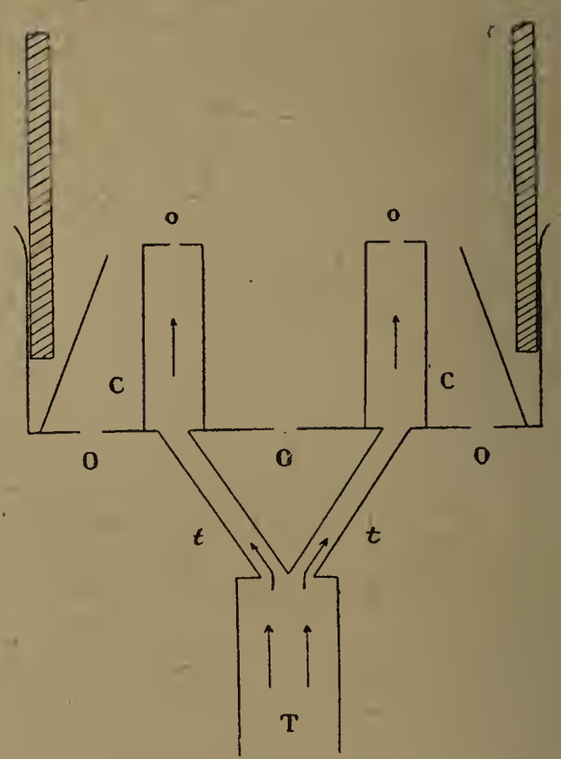


Fig. 142.

La partie supérieure du tube CC est en porcelaine ; c'est dans cette matière que les trous sont percés ; le bec s'use ainsi lentement.

On obtient une flamme circulaire, *continue* à une petite distance des trous, et une combustion complète grâce au double courant d'air.

Comme nous allons le voir à propos des becs auers, il ne faut pas que la combustion soit immédiatement trop complète, que le mélange de l'air et du gaz soit d'abord trop intime : la flamme cesserait d'être éclairante. Dans les becs dits *économiques*, on limite l'arrivée de l'air. On réduit ainsi la dépense en gaz, mais on risque d'obtenir une flamme rouge et fumeuse. La limitation de l'arrivée de l'air résulte du rétrécissement des trous O.

3° — Composition du gaz.

Le gaz d'éclairage contient en moyenne :

Gaz des marais, méthane, CH^4	35
Hydrogène	45
Oxyde de carbone CO	10
Éthylène C^2H^4.	4
Acide sulfhydrique, azote, etc. . . . pour le reste.	

Les hydro-carbures dont les vapeurs subsistent sont la benzine, le toluène.

Le gaz est asphyxiant en raison de l'acide sulfhydrique et surtout de l'oxyde de carbone qu'il contient. A Paris on ajoute au gaz d'éclairage du gaz *à l'eau*, moins cher, sous prétexte qu'on ne le rend pas ainsi notablement plus dangereux.

La consommation en gaz est d'environ 100 litres par carcel heure pour les meilleurs becs. Par l'emploi de becs à récupération où l'air à brûler est d'abord échauffé au contact des produits de la combustion, on abaisse la consommation à 50 litres. Le mètre cube de gaz coûtant 20 centimes en moyenne, le carcel heure revient à 2 centimes.

145. **Bec Auer.**

1° — Le bec Auer est un bec bunsen coiffé d'un cône C porté à l'incandescence.

Le tube AA est percé de trous O dont on règle l'ouverture avec la bague B; le gaz arrive par en bas, l'air par les trous O.

Un tube D entre librement autour du tube A : il est fermé en haut par une toile métallique. Il porte la monture du verre V et le support du gros fil de fer EF.

Ce fil soutient le manchon incandescent; on le règle en hauteur avec la vis V.

Le bec renversé est exactement construit comme un bunsen retourné de 180°; le manchon d'oxyde de forme quasi sphérique est fixé au bas du tube. L'acétylène arrive par une sorte de tuyère, assez rapidement pour entraîner l'air, de manière que le feu ne se communique pas aux orifices d'entrée du gaz ou de l'air (que le bec ne brûle pas en dedans). L'avantage de ce système est qu'il n'y a plus d'ombre portée par le pied de l'appareil (éclairage des wagons).

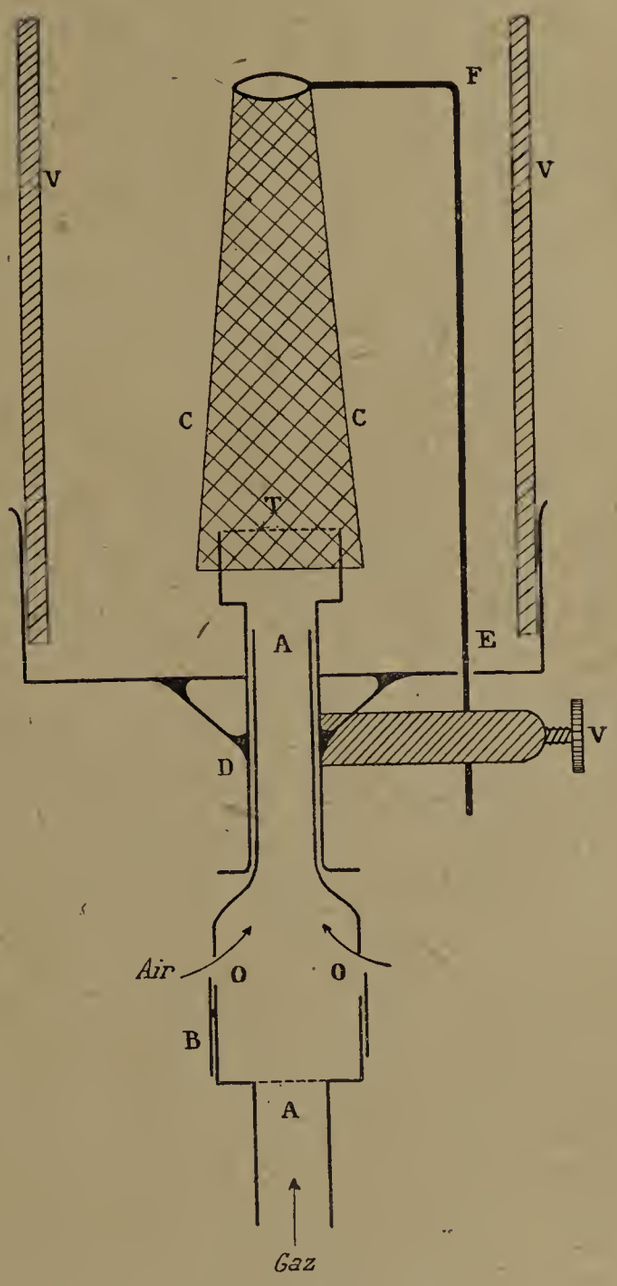


Fig. 143.

2° — Manchons Auer.

Les manchons sont constitués par des mélanges d'oxydes des terres rares (oxydes de thorium, de cérium, de zirconium).

Une infinité de brevets ont été pris pour protéger leur fabrication. Par exemple les nitrates et acétates sont incorporés à une soie artificielle; avec les fils obtenus on tresse le manchon. La carcasse peut être en fibres qu'on imprègne des sels, etc.

Tout le monde sait que la carcasse, quelle qu'elle soit, brûle la première fois qu'on allume le bec; dès lors le manchon devient infiniment fragile.

146. **Éclairage et chauffage au moyen de liquides préalablement vaporisés (essence, alcool).**

1° — Les lampes construites sur ce principe rappellent la lampe d'*émailleur* dont on se sert pour souder les tubes de plomb et dont le schème est représenté dans la figure 144.

Une petite lampe à alcool L chauffe le réservoir R plein d'alcool. Le liquide vaporisé sort par un tube T; on l'enflamme à l'extrémité E du tube. D'où une flamme longue, mince et très chaude. Suivant la position de l'extrémité E,

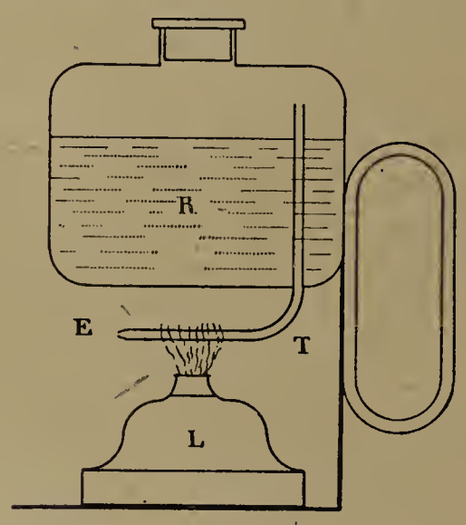


Fig. 144.

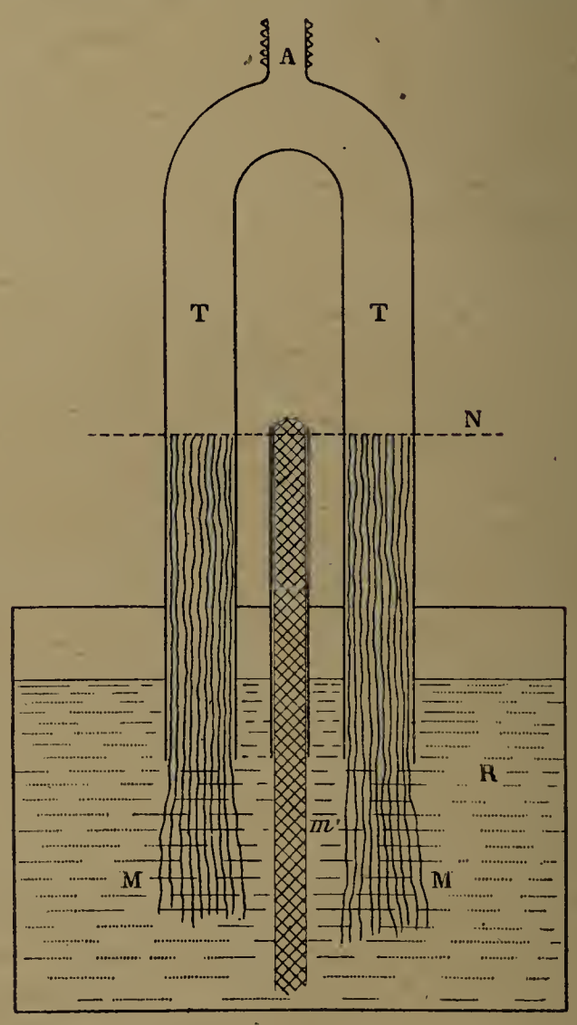


Fig. 145.

il est parfois possible d'enlever la lampe à alcool, une fois la lampe amorcée.

Passons à la lampe à essence ou alcool (fig. 145) pour éclairage.

Sur le réservoir à liquide volatif R sont soudés deux tubes T qui se raccordent à leur partie supérieure et sont terminés par un ajustage A. Ils sont à moitié remplis d'une mèche lâche amenant le liquide par capillarité au niveau N.

On active sa volatilisation au moyen d'une petite flamme auxiliaire

(*veilleuse*) fournie par la mèche ronde tressée *m*. Un pignon (non représenté) permet de régler cette flamme en hauteur. La vapeur sort par l'ajustage A; on l'utilise dans un bec à manchon ou sans manchon.

Pour se servir de la lampe, on allume la veilleuse, on attend 2 ou 3 minutes que les tubes T se soient échauffés; on peut alors allumer le bec.

2° — Lorsque le liquide est très volatil (*essence de pétrole*), la flamme principale chauffe assez le réservoir pour qu'on puisse supprimer la flamme auxiliaire. Il faut seulement au début produire une élévation de température du réservoir à essence qui permette l'allumage. On y parvient en le chauffant avec un tampon de coton imprégné d'alcool qu'on allume, ou par tout autre moyen analogue.

On construit sur ce principe des fers à souder où la flamme produite par la vaporisation de l'essence contenue dans le manche (qui est creux) maintient le fer au rouge.

Si l'appareil est simplifié par la suppression de la flamme auxiliaire, il fonctionne mieux avec cette flamme qui, au surplus, écarte tout danger en permettant d'éloigner le réservoir de la flamme principale.

3° — Lampe Wells aux huiles minérales lourdes.

Cette lampe, d'une intensité de 100 carcels, sert à éclairer les chantiers. Elle se compose d'un réservoir spacieux à moitié plein de pétrole *lourd* (densité égale ou supérieure à 0,850). A l'aide d'une pompe à main, on comprime de l'air au-dessus du pétrole, à une pression suffisante pour forcer le liquide à s'écouler en quantité voulue à l'extrémité supérieure d'un long tube vertical.

Il faut que le pétrole sorte à l'état gazeux. Pour cela l'extrémité du tube est enroulée en serpentin et retourné de manière que la flamme passe dans ce serpentin, l'échauffe et y vaporise le liquide.

Pour amorcer l'appareil, on chauffe le serpentin par un procédé quelconque, par exemple en allumant au-dessous un peu d'essence de pétrole.

L'intensité est de 100 carcels pour une consommation horaire de 6 litres. Mais c'est un appareil lourd et volumineux.

147. Éclairage à l'acétylène.

1° — L'acétylène résulte de l'action du carbure de calcium sur l'eau :

$$C^2\,Ca + H^2O = Ca\,O + C^2\,H^2.$$

La plupart des appareils qui produisent le gaz à mesure de la consommation, sont basés sur le principe suivant (fig. 146). Un réservoir R fermé par un bouchon à vis contient de l'eau; un réservoir S contient un panier métallique plein de carbure. L'eau peut s'écouler de R et S par le tube *t*; elle tombe sur le cône E, suit les parois de S et agit sur le carbure à la base du panier. Le gaz produit sort par le tube T et s'emmagasine au haut du réservoir R.

Pour régler la pression, une petite plaque métallique est fixée sur une membrane qui ferme le trou B. La plaque est articulée sur un levier O A tournant autour de l'axe O. Quand la pression du gaz dépasse une certaine limite (10 à 30 centimètres d'eau), elle agit sur la membrane, sur la plaque, par suite sur le levier qui ferme l'orifice d'admission de l'eau.

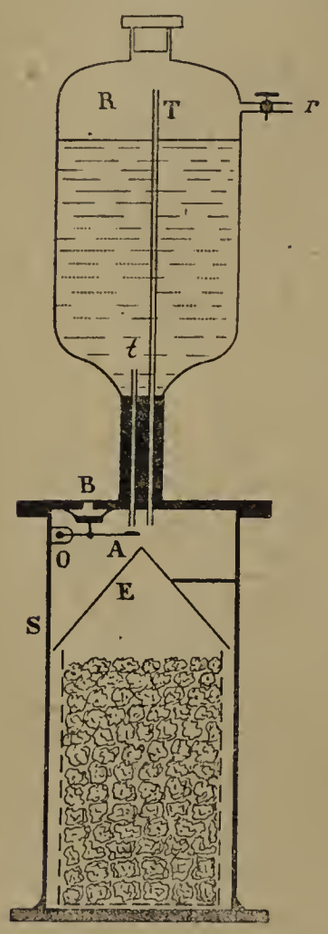


Fig. 146.

Pour l'usage le gaz sort par le robinet *r*.

Il faut environ 1 litre d'eau pour 10 kilogrammes de carbure. Le poids atomique du calcium étant 40, la formule (1) indique environ un litre d'eau pour 3,5 kilogs de carbure; mais tant s'en faut que le carbure du commerce réponde à la formule théorique. Il faut compter une consommation de 8 litres de gaz par carcel heure. Le mètre cube d'acétylène revient à 1 fr. 50; cela met le carcel heure à 1,2 centime.

2° — Becs.

Suivant le rapport d'air et d'acétylène, la flamme est bleue et quasiment incolore (air en excès), ou fuligineuse (air en défaut).

Il faut choisir le rapport qui donne le maximum de pouvoir éclairant.

On fait écouler l'acétylène sous une pression notable (15 à 30 centimètres d'eau) par des becs percés d'un trou très fin : l'inconvénient est l'encrassement rapide de ce trou. Parfois on écrase l'un contre l'autre deux jets de manière à former une flamme plate, mince et très éclairante; son éclat intrinsèque sur la tranche est considérable, ce qui la rend singulièrement commode pour éclairer des fentes.

Pour éviter l'encrassement des becs, dans les installations fixes, on mélange à l'acétylène une certaine quantité d'air. On peut ainsi augmenter le diamètre des orifices et diminuer la pression, *ce qui diminue la quantité de gaz perdue par les fuites* inévitables dans une longue canalisation. Les mélanges dangereux contiennent de 5 à 25 p. 100 d'acétylène; le maximum de puissance explosive correspond à 10 p. 100. Dans l'éclairage, on se sert de mélanges à 70 p. 100 d'acétylène qui ne sont pas dangereux; la pression peut être réduite à 5 centimètres d'eau.

On utilise l'acétylène dissous dans l'acétone à la pression de 10 atmosphères. Les récipients contiennent des briques poreuses imprégnées d'acétone; ils renferment 100 fois leur volume d'acétylène à la pression ordinaire. L'entraînement d'acétone n'a pas d'importance et ne cause qu'une perte de 6 centimes par mètre cube de gaz.

3° — Étalon a l'acétylène.

L'acétylène n'étant pas, comme le gaz d'éclairage, de composition

éminemment variable, il était naturel de l'utiliser pour un étalon. On proposa l'emploi d'une flamme s'écoulant par un tube de diamètre connu, sous une pression connue. On proposa l'emploi d'une flamme quelconque devant laquelle on dispose un écran de dimensions connues : c'est admettre que toutes les flammes ont même éclat intrinsèque.

Il ne semble pas que ces étalons soient aussi parfaits que le croient leurs inventeurs.

CHAPITRE IV

ÉMISSION. DIFFUSION

Émission.

La théorie générale de l'émission est extrêmement compliquée : sa place n'est pas ici. La relation qui existe entre les pouvoirs émissifs et les pouvoirs absorbants, la manière dont l'émission dépend de la température, l'étude détaillée des spectres d'émission, toutes ces questions, pour être traitées dans leur ensemble, demandent un volume entier.

Le problème que nous allons étudier, est beaucoup plus modeste. Prenant l'émission comme un fait et sans nous préoccuper de sa cause, comment l'éclairement varie-t-il quand la surface éclairée se déplace par rapport à celle qui l'éclaire? Comme nous le verrons, le même problème se pose à propos de la diffusion. Il s'agit là de phénomènes concrets et simples.

Nous allons raisonner sur un faisceau monochromatique : les résultats se généralisent immédiatement pour un faisceau complexe.

148. Indicatrice d'émission. Loi de Lambert.

J'ai insisté sur le fait que, d'après sa définition, l'éclat intrinsèque ε dépend essentiellement de la direction d'émission : il s'agit de préciser de quelle manière. Le problème se présente identique pour les corps lumineux par eux-mêmes que nous étudierons d'abord, et pour ceux qui ne font que restituer une partie de la lumière reçue, c'est-à-dire pour les *matières colorées* qui nous occuperont par la suite.

Il semble naturel d'admettre que pour les surfaces lumineuses par elles-mêmes, le phénomène est de révolution autour de la normale à l'élément considéré : ε ne dépend donc que de l'angle θ de la direction d'émission avec cette normale :

$$\varepsilon = f(\theta). \qquad (1)$$

L'équation (1) représente en coordonnées polaires une courbe qu'on appelle *indicatrice d'émission;* c'est la méridienne de la surface d'émission. La symétrie exige que la fonction $f(\theta)$ soit paire par rapport à θ, c'est-à-dire qu'on ait : $f(\theta) = f(-\theta)$.

On s'attend à ce que la fonction $f(\theta)$, maxima pour $\theta = 0$, s'annule pour l'émission rasante $\theta = \pi : 2$. Bref l'indicatrice d'émission doit avoir l'allure des courbes que représente la figure 147.

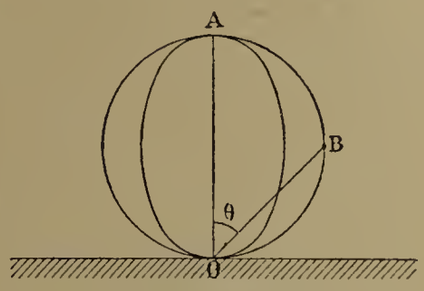


Fig. 147.

La loi de Lambert consiste à poser que l'indicatrice d'émission est une circonférence de cercle.

On a :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos\theta,$$

où ε_0 est l'éclat dans la direction normale.

On généralise le plus simplement possible la loi de Lambert en écrivant :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos^n \theta.$$

Pour la même valeur de ε_0, l'indicatrice d'émission est en tous ses points intérieure à la circonférence de Lambert : quand l'obliquité augmente, l'émission diminue plus rapidement que le veut la loi de Lambert.

149. Pouvoir émissif.

L'élément émet suivant la loi $\varepsilon = f(\theta)$.

Cherchons la quantité totale émise : c'est par définition, le *pouvoir émissif* s de l'élément θ.

D'un de ses points O, menons une sphère de rayon 1.

L'angle solide compris entre deux cônes d'axes ON et d'angles au sommet θ et $\theta + d\theta$, est :

$$2\pi \overline{AB} \,.\, d\theta = 2\pi \sin\theta \,.\, d\theta.$$

D'où :

$$s = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) \,.\, \sin\theta \,.\, d\theta.$$

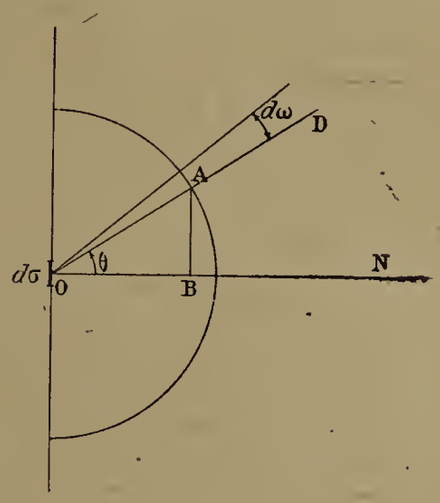


Fig. 148.

Quand la loi de Lambert s'applique, on a :

$$f(\theta) = \varepsilon_0 \cos\theta, \qquad s = \pi \varepsilon_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2\theta \,.\, d\theta = \pi \varepsilon_0. \qquad (1)$$

Pour la loi de Lambert généralisée, on a :

$$f(\theta) = \varepsilon_0 \cos^n \theta, \qquad s = \frac{2\pi \varepsilon_0}{n+1}.$$

Nous pouvons donc nous servir également des quantités s et ε_0, puisqu'elles ne diffèrent que par un facteur numérique.

Le *pouvoir émissif* est pour l'émission l'analogue de l'*éclairement* pour la réception ; il s'agit dans les deux cas de la quantité totale d'énergie, indépendamment des directions suivant lesquelles elle est émise ou reçue.

150. Applications de la formule de Lambert.

Voici à titre d'exercices, divers résultats donnés par Lambert.

1° — Lumière émise dans un cône ayant la normale ON pour axe.

Il faut appliquer la formule (1), mais en intégrant de 0 à θ; θ est le demi-angle au sommet du cône. On a :

$$Q = \pi \varepsilon_0 \int_0^\theta \sin 2\theta \,.\, d\theta = \frac{\varepsilon_0}{2}(1 - \cos^2\theta) = \pi \varepsilon_0 \sin^2\theta.$$

2° — Lumière émise dans un secteur compris entre le plan de l'élément et deux plans passant par la normale.

Soit ψ l'angle des plans.

Puisque le phénomène est de révolution autour de ON, on a :

$$Q = \varepsilon_0 \psi : 2.$$

Il faut en effet retrouver $\pi\varepsilon_0$ quand on pose $\psi = 2\pi$.

3° — Lumière émise dans un cone circulaire quelconque d'angle α.

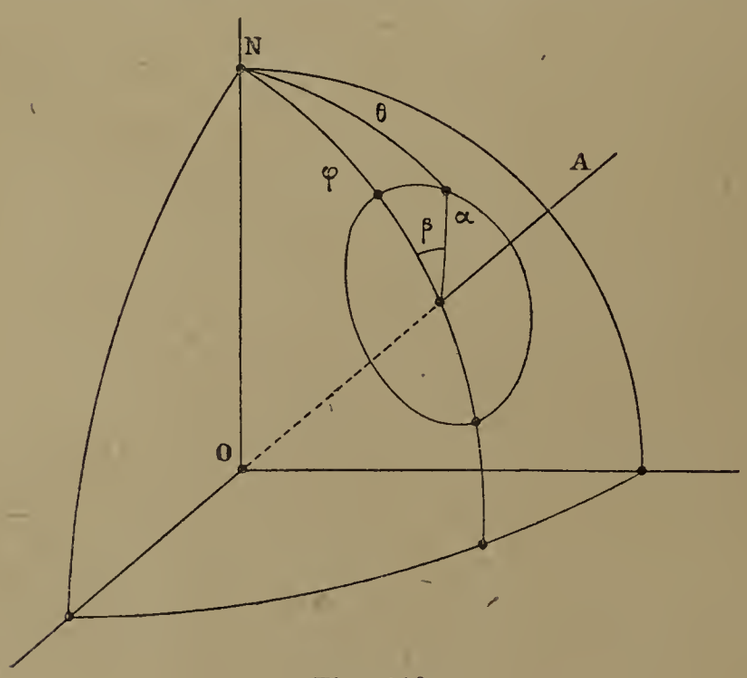


Fig. 149.

Soit φ l'angle que fait l'axe OA du cône avec la normale ON.

Divisons le cône au moyen de cônes de demi-angles au sommet α e $\alpha + d\alpha$, et de plans faisant avec AON l'angle β.

L'élément d'angle solide est :

$$\sin\alpha \,.\, d\alpha \,.\, d\beta.$$

La lumière émise dans cet élément est :

$$d\varphi = \varepsilon_0 \cos\theta \,.\, \sin\alpha \,.\, d\alpha \,.\, d\beta.$$

En vertu de la formule de trigonométrie sphérique :

$$\cos\theta = \cos\varphi \,.\, \cos\alpha + \sin\varphi \,.\, \sin\alpha \,.\, \cos\beta,$$

on a : $$d\varphi = \varepsilon_0 d\alpha d\beta (\cos\varphi \,.\, \cos\alpha \,.\, \sin\alpha + \sin\varphi \,.\, \sin^2\alpha \,.\, \cos\beta).$$

Il faut intégrer par rapport à β entre 0 et 2π.

Le second terme de l'intégrale ne donne rien. Il reste :

$$Q = \pi \varepsilon_0 \int_0^\alpha \cos\varphi \,.\, \sin 2\alpha \,.\, d\alpha = \pi \varepsilon_0 \sin^2\alpha \,.\, \cos\varphi.$$

Ainsi la quantité envoyée dans le cône d'axe OA est celle qui serait envoyée dans le cône de même ouverture d'axe ON, multipliée par le cosinus de l'angle NOA.

151. Conséquences de la loi de Lambert.

1° — Réciprocité des surfaces émettrice et réceptrice.

Calculons le flux envoyé par l'élément $d\sigma$ sur l'élément $d\sigma'$ situé à la distance r. La droite OO′ qui les joint, fait les angles θ et θ' avec les normales ON et O′N′.

Les angles solides $d\omega$, $d\omega'$, sous lesquels les éléments $d\sigma$, $d\sigma'$, sont respectivement vus d'un point des éléments $d\sigma'$, $d\sigma$, ont pour expressions :

$$d\omega = \frac{d\sigma \,.\, \cos\theta}{r^2}, \qquad d\omega' = \frac{d\sigma' \,.\, \cos\theta}{r^2}.$$

Le flux envoyé par $d\sigma$ dans $d\sigma'$ est :

$$dQ = \varepsilon_0\, d\sigma \,.\, \cos\theta \,.\, d\omega' = \varepsilon_0 \frac{d\sigma \,.\, d\sigma'}{r^2} \cos\theta \,.\, \cos\theta' = \varepsilon_0 \,.\, r^2 \,.\, d\omega : d\omega'.$$

Ces formules sont parfaitement symétriques. *Il revient donc au même de calculer ce qu'une surface σ envoie sur une autre surface σ', ou de calculer ce que σ' envoie sur σ, l'éclat ε_0 restant le même.*

Par exemple, le problème 3° du paragraphe précédent revient à demander *quel est le pouvoir éclairant d'une portion circulaire quelconque de la voûte céleste.*

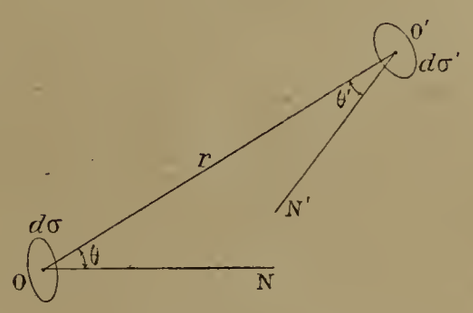


Fig. 150.

2° — Impossibilité de reconnaître la forme des corps.

Reprenons la formule :

$$dQ = \varepsilon_0 \,.\, \cos\theta \,.\, d\sigma \,.\, d\omega' = \varepsilon_0 \,.\, \cos\theta' \,.\, d\sigma' \,.\, d\omega. \qquad (1)$$

Sur un appareil d'aire σ', recevons les radiations émanées d'un corps C assez éloigné pour que tous les rayons tombent sensiblement suivant le même angle; θ' est donc constant. La formule (1) intégrée devient :

$$Q = \int d\varphi = \varepsilon_0 \sigma' \cos\theta' \int d\omega = \varepsilon_0 \sigma' \cos\theta' \,.\, \omega.$$

La quantité reçue est proportionnelle à l'angle solide ω sous lequel on voit le corps lumineux d'un point quelconque de la surface σ'.

La forme du corps C et sa distance ont disparu de l'expression de l'énergie.

Expériences.

Une sphère qui émet suivant la loi de Lambert, est vue comme un disque plat.

Une barre de fer ou d'argent à section carrée, ou un cylindre portés au rouge ont exactement le même aspect. Si l'on fait tourner la barre carrée, le mouvement est sensible à cause de la variation du diamètre apparent, non pas à cause de la visibilité de l'arête. Ces expériences

prouvent que le fer ou l'argent portés au rouge émettent (au moins très approximativement) suivant la loi de Lambert.

Une pile thermoélectrique de section droite σ' reçoit la même énergie d'un corps C (un cube métallique rempli d'eau bouillante et dont les faces sont recouvertes des corps à étudier), quelles que soient la forme, la distance et l'orientation de celui-ci, pourvu qu'il soit toujours rencontré par le cône d'angle solide ω' dont les génératrices s'appuient sur les bords du trou percé dans l'écran E.

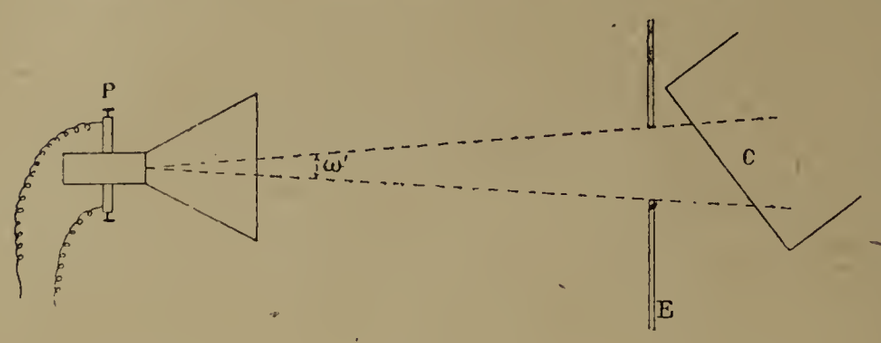


Fig. 151.

152. Emploi photométrique de la pile thermoélectrique ou du bolomètre.

En raison des applications que nous en ferons, il est nécessaire de prendre une idée précise de la manière d'utiliser une pile thermoélectrique, un bolomètre, d'une manière générale un appareil mesurant la quantité d'énergie qu'il reçoit, par son échauffement et par le courant électrique qui en résulte.

Posons que l'échauffement dû au faisceau supposé d'intensité constante varie suivant une exponentielle du temps ; posons que le courant est à chaque instant proportionnel à l'échauffement.

Assimilons l'aiguille du galvanomètre à un pendule oscillant avec un frottement proportionnel à la vitesse. L'équation différentielle est :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + f\frac{d\theta}{dt} + C\theta = \gamma(1 - e^{-\alpha t}). \qquad (1)$$

γ *mesure* l'intensité du faisceau.

Si nous attendons un temps suffisant, la déviation permanente θ est proportionnelle à γ. Mais il est impossible d'opérer de cette manière, ne serait-ce que parce que les expériences n'en finiraient pas.

La méthode consiste à ramener l'aiguille au repos, à découvrir brusquement la source de chaleur, à déterminer l'arc Θ de première impulsion de l'aiguille, puis à recouvrir la source.

Il s'agit de montrer que Θ et γ sont proportionnels.

Cela ne présente aucune difficulté, puisque l'équation (1) est complètement intégrable par une expression de la forme :

$$\theta = \theta_0 e^{-\lambda t}\sin(\omega t + \varphi) + (a + be^{-\alpha t}).$$

On détermine les constantes a et b de manière que la parenthèse soit une intégrale particulière de (1).

On détermine ensuite les constantes arbitraires θ_0 et φ de manière qu'au temps 0, on ait $\theta = 0$ et $d\theta : dt = 0$.

Les paramètres λ et ω satisfont aux conditions (*Magnétisme et Electricité*, I, § 147) :

$$\omega^2 = \frac{C}{I} - \frac{f^2}{4I^2}, \qquad \lambda = \frac{f}{2I}.$$

2° — Pour mieux fixer les idées du lecteur, traitons au long le cas où l'amortissement est très petit. Posons $\lambda = 0$. On a :

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi) + \gamma\left(\frac{1}{C} - \frac{e^{-\alpha t}}{\Delta}\right), \qquad (2)$$

avec les conditions : $\omega^2 = C : I$, $\Delta = I\alpha^2 + C$.

Écrivons que $\theta = 0$, pour $t = 0$:

$$\theta_0 \sin\varphi + \gamma\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{\Delta}\right) = 0, \qquad \theta_0 \sin\varphi + \frac{\gamma}{\Delta}\frac{\alpha^2}{\omega^2} = 0.$$

Écrivons que $d\theta : dt = 0$, pour $t = 0$:

$$\theta_0 \cos\varphi + \frac{\gamma\alpha}{\Delta\omega} = 0.$$

D'où :

$$\theta_0 = \frac{\gamma\alpha}{\Delta\omega}\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}}, \qquad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\alpha}{\omega}.$$

L'intégrale est ainsi complètement déterminée.

Pour calculer l'arc de première impulsion, il faut écrire que la vitesse $d\theta : dt$ est nulle, pour $\theta = \Theta$.

L'équation donnant le temps du maximum est :

$$\cos(\omega t + \varphi)\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}} + e^{-\alpha t} = 0.$$

Elle fournit une valeur de t qui dépend des paramètres caractéristiques de l'appareil, *mais ne dépend pas de* γ. *On a donc :*

$$\theta = A\gamma,$$

où A est un facteur calculable une fois pour toutes.

Ce qu'il fallait démontrer.

3° — Soit α grand devant ω ; c'est dire que la période d'oscillation de l'aiguille est longue devant le temps nécessaire pour que l'appareil acquière à peu près sa température limite.

On a sensiblement : $\varphi = \pi : 2$, $\theta_0 = \gamma : C$.

D'où :

$$\theta = \frac{\gamma}{C}(1 - \cos\omega t).$$

L'amplitude maxima est :

$$\Theta = 2\gamma : C.$$

Elle est double de l'amplitude limite *d'équilibre*.

La méthode que nous étudions, est donc avantageuse à la condition que la période d'oscillation soit assez longue.

Si α est très petit (l'appareil ne s'échauffe que très lentement), l'arc de première impulsion est quasi nul.

Le lecteur vérifiera que les phénomènes généraux sont les mêmes quand le frottement n'est pas nul : mais les formules sont plus compliquées. Elles n'ont du reste aucun intérêt; ce que je dis pour qu'on ne s'en encombre pas.

153. Exactitude de la loi de Lambert.

La loi de Lambert s'applique aux corps mats, non polis, lumineux par eux-mêmes, en particulier aux corps *parfaitement noirs* (noir de fumée) : nous verrons qu'un corps *noir* est le plus lumineux de tous les corps à la température de l'expérience, pourvu qu'on prenne le mot *lumière* dans le sens général de radiation.

Mais la loi de Lambert n'est pas générale. Par exemple, le soleil n'apparaît pas rigoureusement comme un disque plat; son éclat est plus grand au centre qu'au pourtour (§ 158).

On généralise la loi de Lambert en posant :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos^n \theta, \qquad s = \frac{2\pi\varepsilon_0}{n+1}.$$

L'expérience du § 151, *2°*, permet des vérifications précises pour les radiations calorifiques à la température ordinaire.

Les faces du cube sont recouvertes des corps à étudier.

Généralement la quantité d'énergie Q reçue par la pile n'est pas indépendante de l'azimut du cube ; *elle diminue quand l'angle* θ *augmente.*

Pour la *céruse*, par exemple, on trouve :

$Q =$	100	84	66
pour $\theta =$	0	70°	80°

154. Influence de l'épaisseur.

L'émission par la surface du corps A recouverte d'une couche de corps B est caractéristique du corps A quand l'épaisseur de la couche est nulle; elle devient peu à peu caractéristique du corps B quand l'épaisseur est suffisante. L'émission n'est donc pas localisée à la surface des corps; elle se produit dans une couche dont l'épaisseur est d'autan plus grande que le corps est plus transparent.

Prenons comme surface émettante une des faces métalliques d'une caisse cubique pleine d'eau bouillante. Déterminons l'émission au moyen d'une pile thermoélectrique. L'expérience montre qu'elle augmente quand on recouvre le métal d'une mince couche de colle, à peu près proportionnellement à l'épaisseur de la couche.

A partir d'une épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre, l'émission ne varie plus : tout se passe comme si l'épaisseur était très grande.

Pour chaque substance et chaque radiation, on peut ainsi déterminer une épaisseur limite : elle dépend de la substance et de la radiation.

Ces expériences prouvent quel soin il faut apporter à la préparation des couches dont on veut déterminer le pouvoir émissif. Si on les agglutine avec de la colle, on détermine les propriétés de la colle et non celle de la poudre étudiée. Il faut employer comme agglutinant un corps (eau, alcool, éther) qui s'évapore complètement.

Diffusion.

155. Diffusion.

J'insiste sur la diffusion en raison de son importance pour la suite de ce volume.

1° — Les corps diffusants ne sont pas lumineux par eux-mêmes; ils

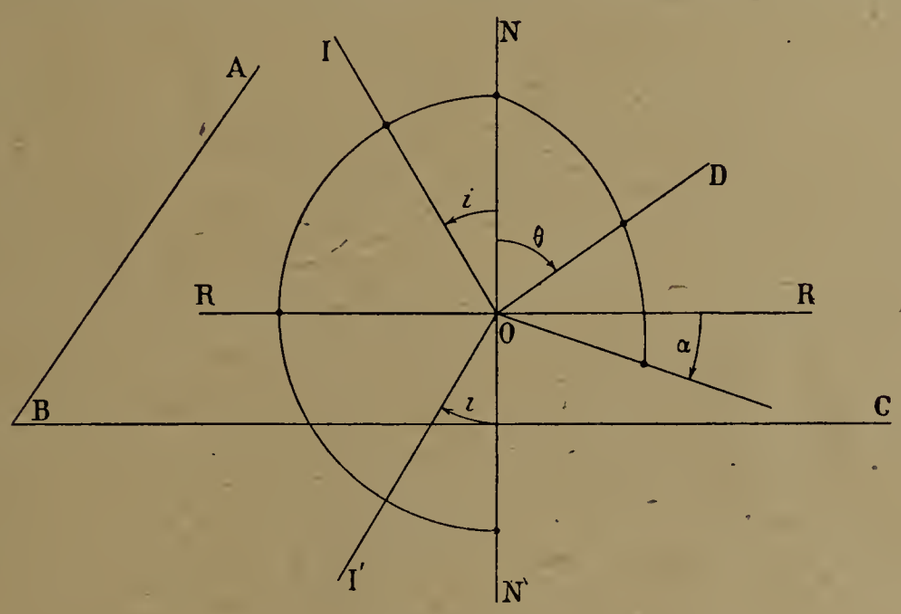


Fig. 152.

n'émettent que lorsqu'ils reçoivent un faisceau lumineux. Les lois sont les mêmes pour la diffusion par réflexion et par transmission.

Voici comment se pose le problème.

Soit ABC le plan diffusant, NON' la normale. On envoie dans la direction IO (diffusion par réflexion), ou I'O (diffusion par transmission) un faisceau de rayons parallèles faisant avec la normale l'angle i.

Prenons comme plan de référence le plan d'incidence; observons dans la direction OD définie par la longitude α (angle du plan NOD avec le plan d'incidence) et par la colatitude θ.

L'éclat ε dans la direction OD est défini comme le rapport de la quantité Q émise par unité d'angle solide dans cette direction moyenne, à la quantité totale Q_0 de lumière incidente :

$$Q = \varepsilon \omega Q_0.$$

ε *est donc ici un rapport.* D'une manière générale on a :

$$\varepsilon = f(i, \alpha, \theta).$$

Par raison de symétrie, la fonction f ne change pas quand on remplace α par $-\alpha$.

Il existe généralement deux fonctions f différentes, l'une pour la réflexion, l'autre pour la transmission.

2° — Diffuseurs orthotropes.

On dit que le diffuseur est orthotrope quand la fonction f est indépendante de i. Comme par raison de symétrie, elle est toujours indépendante de α quand l'incidence est normale, elle doit être simultanément indépendante de i et de α.

On a simplement alors : $\varepsilon = I f(\theta)$;

la surface indicatrice d'émission est de révolution autour de la normale.

Les diffuseurs orthotropes obéissent parfois à la loi de Lambert, le plus souvent à la loi de Lambert généralisée.

$$\varepsilon = I\varepsilon_0 \cos^n \theta ;$$

n est ordinairement compris entre 1 et 2

156. **Méthodes expérimentales.**

1° — La figure 153 représente schématiquement l'appareil de la Provostaye et Desains.

Les rayons solaires sont envoyés par un héliostat sur une lentille de 2 mètres de distance focale et de 10 centimètres d'ouverture.

Ils sont diaphragmés en D et concentrés sur la plaque P à étudier disposée au centre d'un cercle horizontal.

L'axe du faisceau conique des rayons détermine la direction d'incidence moyenne : la figure le suppose normale à la plaque.

Puisque nous posons que la lumière diffusée est proportionnelle à

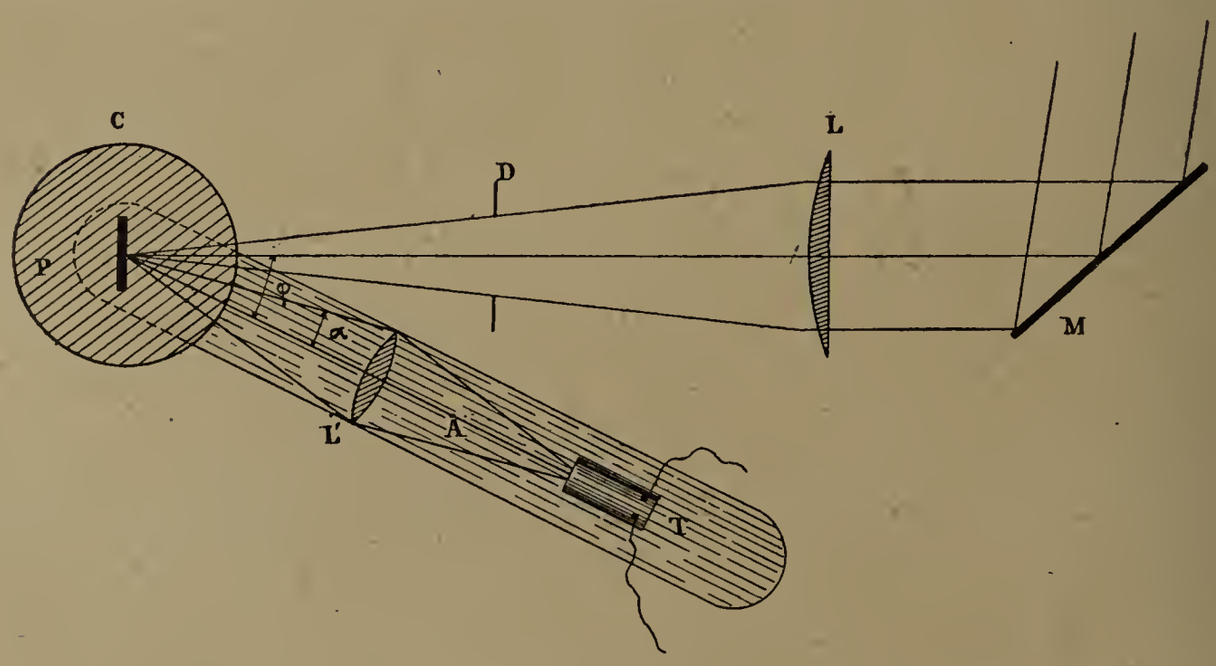


Fig. 153.

la lumière incidente, peu importe que la plaque soit exactement au foyer; autrement dit, peu importe l'aire σ de la plaque éclairée par le

faisceau. Dans chaque direction de diffusion, le produit $\varepsilon\,\sigma$ restera constant, ε diminuant à proportion que σ augmente. Il faut seulement que la surface éclairée soit assez éloignée de la plaque diffusante.

2° — La lumière incidente se répartit sur un hémisphère entier. Pour intense que soit le faisceau incident, la lumière diffusée est donc faible. D'où la nécessité du dispositif suivant. Une planchette A, formant alidade et montée sur un axe vertical, porte la lentille L′ et la pile thermoélectrique T. La lumière reçue par la pile est donc émise dans un cône de demi-angle au sommet α et dont l'axe fait l'angle φ avec l'axe du faisceau incident.

Si la loi de Lambert s'applique, la quantité de lumière reçue est donc (§ 150, *3°*) :

$$Q = Q_0 \,.\, \pi\varepsilon_0 \sin^2\alpha \,.\, \cos\varphi\,;$$

Q_0 est la quantité de lumière incidente; ε_0 est l'éclat diffusif dans la direction normale pour la substance étudiée.

Ici comme plus haut, peu importe la manière suivant laquelle la chaleur se distribue sur la pile thermoélectrique, le plus grand échauffement d'un élément compensant le moindre échauffement d'un autre. Il faut seulement que le nombre des éléments soit assez grand, qu'ils soient isolément de petite section et que l'image de la plaque éclairée P à travers la lentille L′ soit contenue tout entière dans la surface terminale de la pile.

3° — Les expériences *relatives* consistent à faire varier φ et à déterminer la déviation galvanométrique en fonction de cet angle : elle mesure la quantité Q de chaleur reçue.

Si la loi de Lambert s'applique on trouve que Q est proportionnel à $\cos\varphi$.

Pour déterminer les valeurs absolues de ε_0 (qui est un rapport), il faut connaître Q_0 en mêmes unités relatives que Q. Mais le faisceau incident est d'une telle intensité qu'on ne peut songer à le recevoir *directement* sur la pile : d'où l'artifice suivant. On remplace la plaque P par un morceau de verre noir ou noirci au dos; on reçoit le faisceau incident sur la pile *après réflexion sur le verre sous une incidence voisine de la normale* (on ne peut évidemment pas utiliser la réflexion normale). Connaissant l'indice du verre, les formules de Fresnel permettent de calculer le rapport de l'intensité réfléchie à l'intensité incidente : elle est de l'ordre de 1 : 20. On peut alors sans danger envoyer le faisceau réfléchi sur la pile thermoélectrique.

Si la loi de Lambert s'applique, la mesure de la quantité Q diffusée sous l'angle φ et la mesure corrélative de la quantité incidente Q_0, fournissent ε_0 qui est l'unique paramètre de la diffusion.

157. Résultats.

1° — Préparation des plaques diffusantes.

Elle a une importance extrême en raison du § 154. Les corps bien

pulvérisés sont mis en suspension dans de l'eau distillée. On répand l'émulsion sur des plaques de verre horizontales; l'eau s'évapore à la température ordinaire; au bout de quelques jours, la couche est sèche et suffisamment adhérente. Quand les poudres ne veulent pas se tenir en suspension dans l'eau, on emploie l'alcool.

Le degré de pulvérisation intervient dans le résultat : l'épaisseur limite (épaisseur nécessaire pour que la couche se conduise comme si elle limitait un solide indéfini) diminue à mesure que les grains sont plus petits. Nous verrons au § 217 l'explication très simple de ce fait.

2° — Loi de Lambert et orthotropisme.

Pour que la loi de Lambert s'applique et que la plaque soit orthotrope, il faut que la couche soit assez épaisse.

Par exemple, le verre opale est un diffuseur orthotrope par transmission quand l'épaisseur est supérieure à 2 millimètres; pour des épaisseurs moindres, l'influence de l'incidence du faisceau éclaireur intervient.

De même une couche de céruse diffusant par réflexion obéit à la loi de Lambert sous une épaisseur de $0^{mm},4$; elle n'y obéit pas sous une épaisseur moindre : preuve que les couches profondes interviennent dans le phénomène par réflexion. L'épaisseur limite à partir de laquelle les diffuseurs deviennent orthotropes, diminue à mesure que les corps sont plus opaques.

On peut citer comme diffuseurs orthotropes dont l'indicatrice s'éloigne peu de la sphère :

par transmission : le verre dépoli, les verres opales, le papier ordinaire,...;

par réflexion : le marbre mat, le biscuit de porcelaine, l'émail dépoli, la céruse,...

3° — Albedo.

On appelle *albedo* le rapport $A = Q : Q_0$, de la quantité totale diffusée à la quantité incidente. Supposons qu'elle tombe normalement sur la plaque à étudier ou encore que le diffuseur soit orthotrope.

Si le corps obéit à la loi de Lambert, on a :

$$A = Q : Q_0 = \pi\varepsilon_0.$$

Une seule expérience suffit pour déterminer A (§ 156).

Si le corps n'obéit pas à la loi de Lambert, on divise l'hémisphère de diffusion par des cônes ayant pour axe la normale à la surface diffusante.

Soit θ_1, θ_2, θ_3,... leurs demi-angles au sommet.

Les angles solides compris entre ces cônes sont :

$$2\pi(1 - \cos\theta_1)\ldots \qquad 2\pi(\cos\theta_n - \cos\theta_{n+1})\ldots$$

Soit q la quantité émise dans le cône ω sous-tendu par la lentille L′ et dont l'axe fait avec la normale à la surface diffusante l'angle $(\theta_n + \theta_{n+1}) : 2$.

La quantité émise dans la couronne correspondante est :

$$2\pi q\,(\cos\theta_n - \cos\theta_{n+1}) : \omega.$$

L'albedo a pour expression :

$$A = \frac{2\pi}{\omega Q_0} \Sigma q (\cos \theta_n - \cos \theta_{n+1}).$$

On trouve ainsi que la céruse restitue 0,82 de la lumière incidente (mesurée par ses effets calorifiques). L'albedo est à peu près le même pour les poudres blanches anhydres (spath, arragonite, carbonates de chaux et de strontiane, poudre de verre, sel gemme, sel marin, salmiac, chlorure, bromure, iodure de potassium et de sodium ..... pulvérisés).

Éclairages diurne et artificiel.

158. Photométrie du Soleil.

1° — Le Soleil nous apparaît comme un disque d'éclat à peu près uniforme dont le diamètre moyen est de 32′ (0,0093 radian).

Cela correspond à une surface de 67,9 millimètres carrés à un mètre, ou encore à un angle solide de $0{,}679 \,.\, 10^{-4}$.

Soit ε_0 l'éclat de la surface solaire dans la direction normale; soit S la surface du Soleil, R sa distance à la Terre. La quantité de lumière qu'il envoie sur la surface σ placée sur la Terre normalement aux rayons est :

$$Q = \frac{S\varepsilon_0\sigma}{R^2} = 0{,}679 \,.\, 10^{-4} \,.\, \varepsilon_0\sigma, \qquad E = \frac{Q}{\sigma} = 0{,}679 \,.\, 10^{-4} \,.\, \varepsilon_0.$$

Telle est l'expression de l'éclairement à la surface terrestre.

Nous pouvons donc calculer l'éclat de la surface solaire sans connaître *séparément* le rayon solaire et sa distance.

Tout luminaire ayant même éclat normal ε_0 et même diamètre apparent que le Soleil donne le même éclairement. On l'obtiendrait par exemple en plaçant à 1 mètre de l'écran éclairé un disque de 0,93 centimètres de diamètre détaché de la surface solaire.

On acquiert ainsi une idée juste de l'extraordinaire éclat du Soleil.

2° — Mesure de l'éclairement.

Recevons le faisceau solaire sur un écran E normal aux rayons, percé

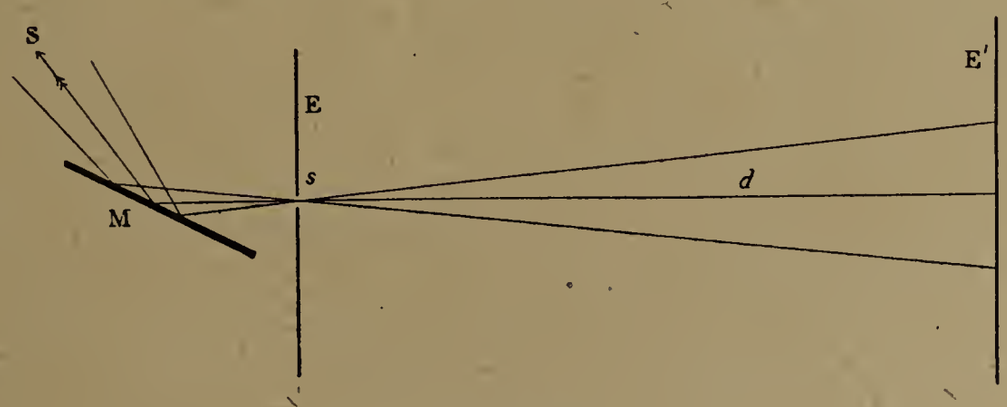


Fig. 154.

d'un trou de *s* millimètres carrés de section, servant de volet à une chambre noire (fig. 154).

Sur un second écran E′, normal aux rayons et placé à d mètres du trou, l'image du Soleil est un cercle d'aire $67{,}9.\,d^2$ millimètres carrés.

L'éclairement de l'écran E′ est donc $s : (67{,}9.\,d^2)$ fois plus petit que si on l'expose directement aux rayons solaires.

Soit $d = 10$ mètres; prenons un trou de 2 millimètres de diamètre ($s = 3{,}14$ m²). Le rapport de réduction est 1 : 2130.

Les rayons solaires sont d'abord réfléchis horizontalement par un miroir M en verre noir ou une glace ordinaire (on supprime alors la réflexion sur la seconde face par un enduit noir convenable, § 286).

Les formules de Fresnel permettent de calculer le facteur de réduction k en fonction de l'indice du verre.

Bref l'éclat i de l'écran E′ en fonction de l'éclat i_0 qui correspond à l'éclairage direct normal, est donné par la formule :

$$i = \frac{i_0 s k}{67{,}9 \times d^2}.$$

La mesure de l'éclairement E se ramène donc à comparer cet éclat à celui que donne un carcel placé devant l'écran E′ à une distance connue. Pour simple qu'elle paraisse, elle a donné des nombres très discordants, en raison de la difficulté de tenir compte de l'absorption atmosphérique. Les estimations varient de 60 000 à 80 000 bougies.

3° — Éclat intrinsèque.

L'aire de la bougie est 2,5 centimètres carrés environ; son intensité horizontale est 1 par définition; son éclat intrinsèque est donc 0,4 bougie par centimètre carré.

L'aire du disque qui à un mètre équivaut au Soleil ou à 60 000 bougies (pour fixer les idées) est : $\pi\, 0{,}93^2 : 4 = 0{,}68$ cm².

L'éclat intrinsèque du soleil est donc :

$$60\,000 : 0{,}68 = 88\,200 \text{ bougies par centimètre carré.}$$

Le rapport des éclats est : $88\,200 : 0{,}4 = 220\,500$.

Ainsi l'éclat intrinsèque du Soleil vaut plus de 200 000 fois celui d'une bougie; deux surfaces d'un centimètre carré prises sur le Soleil et sur la bougie, produiraient à la même distance des éclairements dans ce rapport.

L'éclat du Soleil est environ 50 fois l'éclat du charbon positif d'une lampe à arc.

4° — Si l'atmosphère était parfaitement transparente, une surface normale aux rayons solaires serait éclairée exactement de la même manière tous les jours et à toutes les heures de la journée; en particulier le fait que les rayons sont plus ou moins inclinés sur la verticale, n'interviendrait pas.

Tant s'en faut qu'il en soit ainsi.

Soit r le rayon terrestre, h l'épaisseur verticale de l'atmosphère, ε l'épaisseur dans une direction faisant l'angle z avec la verticale.

On a immédiatement.

$$\varepsilon = \sqrt{2rh + h^2 + r^2\cos^2 z} - r\cos z.$$

ε varie de h pour $z = 0$, à $\sqrt{2rh + h^2}$ pour $z = 90^0$.

Posons : $\eta = \frac{\varepsilon}{h} = \sqrt{\frac{2r}{h} + 1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2 \cos z} - \frac{r}{h}\cos z.$

Soit a le pouvoir absorbant de l'atmosphère *supposé constant.*

Entre l'intensité I des rayons solaires au zénith et l'intensité dans la direction z, on a la relation :

$$I = I_0 a^r.$$

Je donne cette formule pour fixer les idées; car, outre que l'absorption verticale varie d'une heure à l'autre, h est une fraction inconnue de r; de plus l'absorption n'est pas la même pour toutes les couches de l'atmosphère.

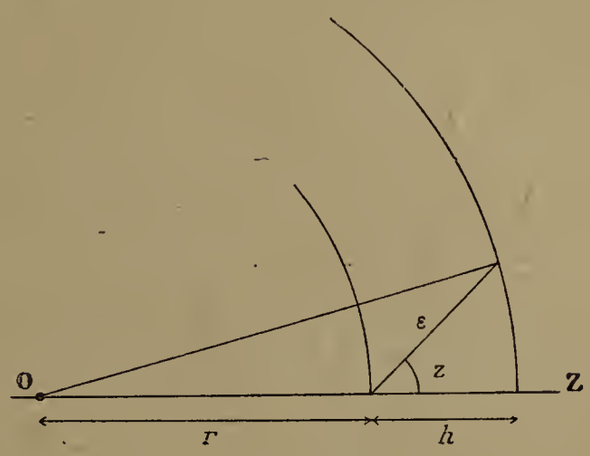


Fig. 155.

Seules ont un sens les expériences effectuées sur une montagne; on élimine ainsi l'action des couches atmosphériques inférieures, par suite on rend moins chanceux le calcul de ce que serait l'éclairement hors de notre atmosphère. Il suffit de dire qu'on a obtenu des nombres 6 fois plus petits que ceux de Bouguer pour montrer à quel point intervient l'absorption atmosphérique.

159. Le Soleil et la loi de Lambert.

Si le Soleil émet suivant la loi de Lambert, il doit paraître comme un disque plat.

Bouguer trouva que le centre est 1,6 fois plus lumineux que le bord.

L'observation directe à travers un verre fumé confirme qualitativement ce résultat.

Les épreuves photographiques du Soleil montrent un décroissement graduel de noir, du centre à la circonférence, mais plus rapide vers le bord.

En recevant sur une pile thermoélectrique des portions diverses de l'image du disque solaire, on trouve des intensités qui diminuent dans le rapport de 2 à 1 du centre au bord. L'ordre de grandeur est le même pour le résultat fourni par un spectrophotomètre.

Il n'y a donc aucun doute possible : l'émission solaire n'obéit pas à la loi de Lambert : l'éclat décroît plus vite que le cosinus de l'angle de la direction d'émission avec la normale à la surface émettante.

160. Photométrie de la Lune.

1° — Éclairement par la pleine lune.

L'éclairement est de l'ordre de la bougie à un mètre. Bouguer trouve 0,2 bougie-mètre. La difficulté de l'expérience vient de ce que les sources d'intensités voisines de celle de la bougie sont rougeâtres par rapport à la lumière de la Lune. Le diamètre apparent de la Lune varie de 1 à 1,14; conséquemment l'éclairement lors de la pleine lune varie de 1 à 1,3.

2° — Éclat intrinsèque.

La Lune et le Soleil ont sensiblement même diamètre apparent.

En vertu de la formule du § 158, *1°*, leurs éclats intrinsèques sont donc dans le même rapport que les éclairements qu'ils produisent.

L'éclat du Soleil est donc à l'éclat de la Lune comme 60 000 est à 0,2; le Soleil est 300 000 fois plus lumineux que la Lune.

3° Albedo de la lune.

Soit E l'éclairement produit par le Soleil sur la Terre ou sur la Lune; vu la proximité de ces deux derniers astres, il est sensiblement le même. Soit S la surface d'un grand cercle de la Lune. La quantité totale de lumière Q_0, que le Soleil lui envoie lors des oppositions, est :

$$Q_0 = ES.$$

Soit ε l'éclat de la Lune : la quantité totale qu'elle émet est (en vertu de la loi de Lambert) : $Q = \pi\varepsilon S$.

L'albedo A a pour définition :

$$Q = AQ_0, \qquad AE = \pi\varepsilon..$$

Transformons cette formule de manière à faire apparaître l'éclairement E′ produit par la Lune à la surface terrestre.

Soit R la distance de la Terre à la Lune.

$$AE = \pi\frac{\varepsilon S}{R^2}\,\frac{R^2}{S} = \frac{\pi E'}{\omega}, \qquad A = \pi\,\frac{E'}{E}\,\frac{1}{\omega}.$$

ω est l'angle solide sous lequel ont voit la Lune de la Terre; il est à peu près le même pour le Soleil. On a donc :

$$\omega = 0{,}679\,.\,10^{-4}.$$

D'ailleurs : $E = 3\,.\,10^5\,.\,E'$.

D'où enfin : $A = 0{,}154.$ (1)

Nous avons vu ci-dessus que pour les corps analogues à la céruse, A = 0,82. La formule (1) donne donc pour le pouvoir diffusif de la surface lunaire un nombre parfaitement acceptable.

En raison de la loi de Lambert, le pouvoir diffusif dans la direction normale est π fois plus petit; il est sans égal à 0,049.

161. Adaptation de l'œil.

Tous ceux qui ont eu l'occasion de se servir d'instruments de mesure, sont confondus d'admiration devant la puissance d'adaptation de l'œil. L'expérience montre que la lecture du texte du présent ouvrage est

aisée avec un éclairement d'une bougie à un mètre ; la fatigue, il est vrai, vient rapidement. Or nous pouvons évidemment lire en plaçant le même texte en plein soleil (ce ne serait pas davantage recommandable pour un travail de longue durée). Donc l'œil remplit son rôle avec des éclairements allant de 1 à plus de 60 000.

Certes ces conditions extrêmes d'emploi ne sont pas avantageuses ; il est préférable de se limiter à des éclairements moyens, de l'ordre de 20 à quelques centaines de bougies-mètre, par exemple. C'est précisément à cause de sa faculté d'adaptation que l'œil est un mauvais appareil photométrique : il n'est capable que de dire si deux éclats sont égaux.

En pleine lumière la sensibilité de l'œil s'émousse : conséquemment ramené dans une chambre peu éclairée, il commence par n'y rien distinguer ; peu à peu, il s'adapte et finit par y voir comme en plein jour.

Le lecteur fera l'expérience suivante. Fermant un œil, il regardera quelques instants avec l'autre une surface très éclairée. Fermant les deux yeux, il s'enfermera dans une chambre très faiblement éclairée. Ouvrant les yeux, il lui semblera être quasiment aveugle d'un œil. L'émoussement de la sensibilité de cet œil est exagéré par contraste.

L'éclairage du jour est incomparablement plus grand que l'éclairage artificiel ; nous qualifions celui-ci *d'a giorno* quand nous le trouvons admirable. Même alors il ferait piètre mine devant celui d'un jour assez gris. Il ne doit son éclat apparent qu'au contraste. Tous nous savons combien un abat-jour qui plonge une salle dans l'obscurité, augmente l'éclat apparent du texte placé dans le champ qu'il limite ; et cela, même s'il ne réfléchit pas. Il fallait être bête comme un médecin en mal de découvertes physiques, pour préconiser l'éclairage diffus par réflexion sur le plafond. Par ce système on diminue à la fois l'éclairage réel et l'éclairage apparent : double bénéfice comme on voit.

Javal préconise l'éclairage artificiel le plus intense possible. La pupille se contracte, dit-il ; par suite un œil médiocre se trouve amélioré. Au surplus on reste toujours au-dessous de l'éclairage diurne qui *évidemment* est le meilleur.

J'avoue que ces sortes de raisonnements me paraissent faux. Nous n'avons pas été créés pour lire du matin au soir ; il est douteux que la lecture intensive soit d'ordre préétabli. Si par-dessus le compte nous passons nos nuits à lire, il me paraît singulier de conclure qu'il faut prolonger le jour le plus exactement possible. Certes il doit exister pour chacun de nous un éclairement optimum ; mais j'admets difficilement qu'il soit « de plusieurs milliers de bougies-mètre ». A qui fera-t-on croire qu'il soit utile de mettre un arc dans sa chambre à coucher sous prétexte que c'est à peu près le seul moyen de réaliser l'éclairage diurne ?

Il faut se méfier des lumières trop riches en rayons ultra-violets : les becs Auer fatiguent certains yeux. On trouve aisément aujourd'hui des verres de besicles ou de lampe jaunes. A leur défaut il est facile d'interposer un verre jaune placé entre son papier et le manchon.

162. Eclairage des écoles.

C'est ici que nos amis les Boches ont montré toute leur sottise. Ils ont établi des lois; en particulier, il fallait une certaine surface de vitrage par mètre carré de plancher; il fallait un éclairage latéral *venant de gauche*; etc., etc.

L'expérience dit simplement que l'éclairage, *unilatéral ou bilatéral*, doit être partout suffisant. Il faut éviter d'éclairer *par devant* pour ne pas fatiguer les yeux avec de la lumière ne tombant pas sur les livres ou les cahiers. Il faut éviter d'éclairer *par derrière* à cause des ombres portées. Enfin si l'on ne peut éviter la lumière solaire directe, il faut la tamiser par des rideaux. Tout le reste est bavardage.

Quant à spécifier que l'école doit être orientée du nord au sud, laissons cela aux théoriciens qui s'amusent. Il suffit d'exiger que les salles d'école ne soient pas au rez-de-chaussée, sur une rue trop étroite, à maisons trop hautes. Il est toujours possible de lui donner un recul suffisant pour que le ciel soit visible de la plus grande partie de la classe.

163. Eclairage des espaces étendus et découverts.

Le jugement que nous portons sur l'éclairage des rues est notablement influencé par la disposition des lumières, par ce qu'on appelle l'*effet d'illumination*. Quand des lumières sont groupées, elles donnent l'illusion d'un éclairement beaucoup plus grand que l'éclairement réel. C'est l'explication des illusions produites par les rampes à gaz.

La flamme d'une bougie se voit la nuit à plus de 500 mètres; son effet comme source lumineuse est nul à cette distance.

L'œil en fait une image extrêmement petite, encore lumineuse, parce qu'il rassemble en un point de la rétine toute la lumière qui tombe sur la pupille. Ces effets faussent l'appréciation de l'éclairement réel; on est fort étonné de ne pouvoir lire dans une rue qui paraît assez brillamment illuminée.

En fait, l'éclairement moyen des rues est généralement très inférieur à une bougie-mètre : pour Paris il est de l'ordre de 1/20 de bougie-mètre, exception faite pour des voies particulièrement éclairées où l'on atteint et dépasse une bougie-mètre.

Les murs des maisons jouent un rôle diffusant considérable; on sait à quel point semble différer l'éclairement par un bec de gaz placé dans une rue ou dans la campagne.

CHAPITRE V

PERSISTANCE DES IMPRESSIONS LUMINEUSES

164. Principe de Talbot.

1° — Pour effectuer les expériences dont nous allons parler, on utilise un petit moteur de ventilateur tournant à raison de 30 tours par seconde (1 800 tours à la minute). Sur l'axe du moteur, au moyen de la vis D, on fixe la pièce représentée par la figure 156. Elle permet de serrer entre le disque D et l'écrou E un ou plusieurs disques de carton enfilés sur l'axe taraudé A. Ce dispositif remplace avantageusement les toupies dont on se servait avant l'introduction des moteurs électriques à grande vitesse angulaire.

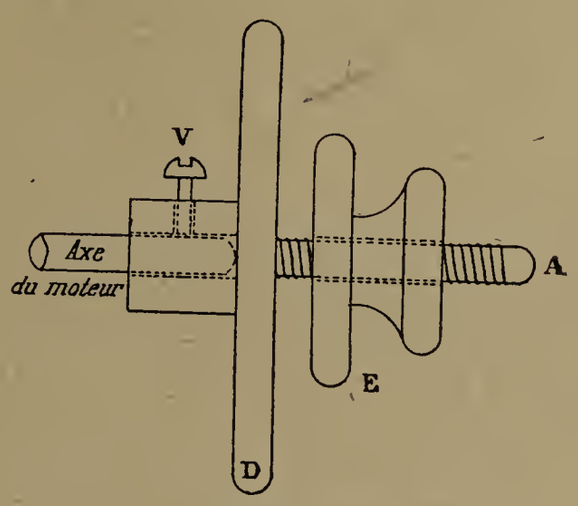


Fig. 156.

La loi fondamentale (connue sous le nom de *principe de Talbot*) a l'énoncé suivant : *La rétine excitée par un faisceau lumineux périodique d'intensité* I, *subit une impression continue qui ne dépend que de l'intensité moyenne :*

$$\frac{1}{T}\int_0^T I dt,$$

pourvu que la période T soit assez courte, inférieure au trentième de seconde, par exemple.

Il y a dans cet énoncé deux parties d'une inégale généralité.

2° — D'abord l'impression est continue; ensuite l'impression est la même que si la même quantité de lumière tombait d'une manière continue ou suivant telle loi périodique qu'on voudra, pourvu que la période soit assez courte.

Le fait de la persistance de la sensation visuelle n'a rien d'exceptionnel. Voici à ce propos une amusante observation que je trouve dans Plateau.

Un enfant promet à un autre de lui donner quelque chose, si celui-ci parvient à détacher de son front une pièce de monnaie que le premier y

appliquera : tous les moyens sont permis, hors celui d'employer la main ou de se frotter le front. Alors le premier enfant appuie *fortement et longtemps* la pièce sur le front de l'autre, puis *il l'enlève adroitement*. C'est chose plaisante que de voir les grimaces, les secousses, les sauts auxquels se livre l'enfant trompé, pour faire tomber une pièce *qu'il sent adhérer à son front..... et qui n'y est plus*.

Fig. 157.

Si la sensation persiste, il est clair que le phénomène doit être continu pour une période assez courte.

3° — Passons à la démonstration de la partie quantitative de la loi. Elle se fait commodément à l'aide des disques tournants.

Utilisons le disque de carton représenté par la figure 157. On peint avec du blanc d'argent et du noir d'ivoire des secteurs, de manière que les sommes respectives des blancs et des noirs soient les mêmes, par exemple égales; mais on les distribue de manières diverses. Le disque représenté est divisé en trois anneaux concentriques; les secteurs valent 180° pour l'anneau central, 90° pour l'intermédiaire, 45° pour l'extérieur. On peut donner au rapport des blancs aux noirs telle autre valeur que l'unité : on peut distribuer les blancs par rapport aux noirs d'une manière plus compliquée.

Le résultat est toujours le même : pour une vitesse suffisante, le disque paraît d'un éclat uniforme et du même éclat sur toute sa surface. Preuve que seul intervient l'éclat moyen :

$$\frac{1}{T}\int_0^t I dt.$$

On peut varier cette expérience mais sans augmenter sa généralité : elle revient toujours à comparer des impressions moyennes, *l'intensité des impressions instantanées restant la même dans tous les cas.*

3° — Pour comparer une impression intermittente à une impression continue, Helmholtz emploie le disque précédent où le noir et le blanc occupent des angles égaux. Le gris obtenu par rotation est alors moitié moins intense que le blanc.

Partant du même blanc, il sépare la lumière émise par moitié au moyen d'un prisme biréfringent.

Il réalise encore une grande surface du même gris en peignant sur

un papier des bandes alternativement blanches et noires d'égale largeur; il place le prisme biréfringent à une distance telle que les images doubles des raies blanches et noires se recouvrent : toute la surface paraît alors d'un gris uniforme.

Ces gris sont rigoureusement les mêmes que celui du disque tournant.

4° — Plateau opère différemment.

Il fait tourner deux disques, l'un blanc, l'autre noir et blanc, à des distances r_1 et r_2 d'une source lumineuse. Il détermine ces distances de manière que les gris soient égaux. Entre les distances et les valeurs 360 et α des angles peints en blanc, il trouve la relation :

$$\alpha : r_2^2 = 360 : r_1^2.$$

Conclusion : *la sensation produite par un disque rotatif est la même que si la lumière émise par chaque point était uniformément distribuée sur le cercle parcouru par ce point.*

Nous reviendrons là-dessus quand nous chercherons à préciser le mécanisme de l'excitation rétinienne (§ 187).

165. Phénomènes classiques résultant de la persistance.

Ils sont en nombre infini; je ne rappellerai que les plus simples pour ne pas répéter ce que le lecteur trouve en d'autres endroits de ce Cours.

1° — Caléidophone.

Prenons dans un étau une lame d'acier de section rectangulaire, une lame de fleuret par exemple. Fixons à son extrémité une petite boule métallique polie, ou encore une grosse tête d'épingle en verre. Exposons-la à la lumière d'une source assez intense. Mettons la verge en vibration; le point brillant, image de la source dans la boule, décrit une trajectoire plus ou moins compliquée *qui paraît continue.* (Mécanique rationnelle, § 342).

Si la verge est à section carrée (ou circulaire) la trajectoire est une ellipse; on peut la considérer comme la résultante de deux mouvements pendulaires rectangulaires :

$$x = a \sin \omega t, \qquad y = b \sin(\omega t - \delta),$$

d'amplitudes différentes, de même période, de phases différentes.

En général les périodes ne sont pas rigoureusement égales; on doit écrire :

$$x = a \sin \omega t, \qquad y = b \sin(\omega t + \omega' t - \delta).$$

Tout se passe comme si les périodes étaient égales; mais comme si la phase variait. *La trajectoire est une ellipse qui se déforme d'autant plus lentement que les périodes sont plus voisines.*

Si la verge est à section rectangulaire, les périodes des mouvements composants sont différentes; on obtient des courbes plus ou moins compliquées. Quand le rapport des périodes est rationnel, la courbe se ferme. Sinon elle se déforme plus ou moins vite; cela revient à dire qu'elle ne se ferme pas.

2° — Figures de Lissajous.

C'est en définitive la même expérience, mais les vibrations composantes rectangulaires sont données par deux diapasons. La figure 158 représente un dispositif commode. L'un des diapasons porte une petite plaque *a* percée d'un petit trou qu'on éclaire vivement; l'autre porte une lentille *b*. Le point *a* décrit un fragment d'horizontale; le centre optique de la lentille *b* décrit un fragment de verticale. La figure 158

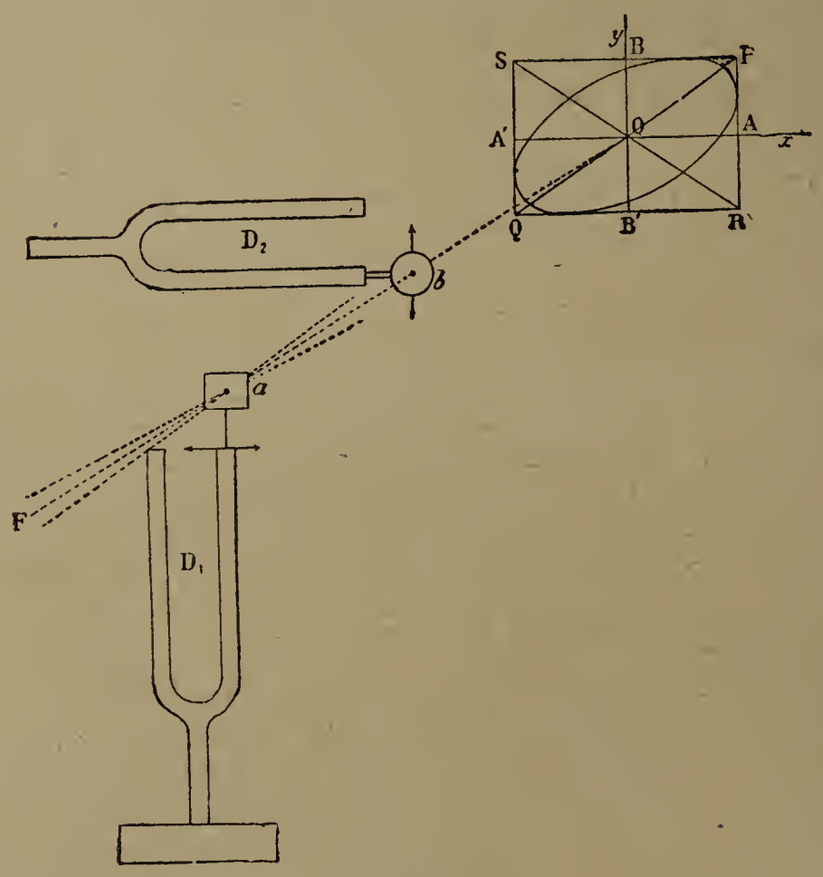


Fig. 158.

suppose les diapasons à l'unisson : la trajectoire de l'image du point *a* dans la lentille est une ellipse.

3° — Miroir tournant.

Le lecteur se reportera à mon Cours d'*Optique Géométrique*; il y trouvera expliqué comment, grâce à la persistance des impressions lumineuses, le miroir tournant montre, en même temps et les uns à côté des autres, les aspects successifs d'un corps de petites dimensions.

4° — Corde vibrante.

On tend une corde *roulée* de piano (corde grave) de manière que sa période soit assez longue.

On la noircit et on colle dessus un grain d'amidon qu'on éclaire fortement. On regarde avec un microscope peu grossissant ou une simple loupe. On voit continue la trajectoire du grain d'amidon.

166. **Thaumatrope.**

1° — Parallèlement à l'axe du moteur et dans son prolongement, montons une plaque métallique, suffisamment rigide pour ne pas se

déformer pendant la rotation malgré l'inévitable gauchissement (fig. 159). Collons dessus un dessin (la figure représente une circonférence); mettons en rotation rapide. Plaçons l'œil O sur la normale à l'axe passant par le point C : nous voyons le dessin comme si la plaque était immobile et normale au regard.

Cela tient à ce qu'au voisinage de cette position, une rotation notable de la plaque n'entraîne qu'une déformation quasi nulle du dessin, projeté sur le plan π normal à OC. C'est ce que montre la figure 159 en

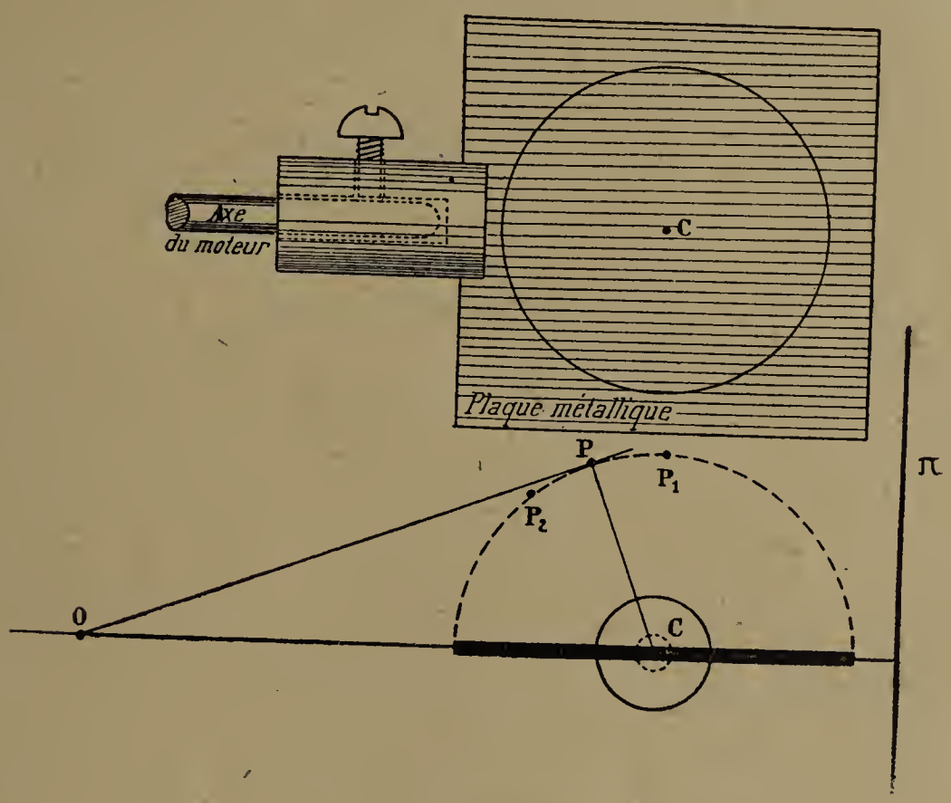


Fig. 159.

bas. Pour tout l'arc P_1P_2, le mobile P se projette quasiment au même point du plan π pour l'œil placé en O. Quand l'œil est assez loin, la droite CP est quasi normale à OC.

2° — Ceci posé, collons deux dessins respectivement sur les faces de la plaque; par la rotation, ils se combinent en un dessin unique.

On complique l'expérience, en utilisant deux plaques rectangulaires; on dessine sur chacune d'elles le quart du dessin : les quatre parties sont fusionnées par la rotation.

167. Vision d'un objet animé d'un mouvement de rotation.

1° — Autour de l'axe O tournent solidairement une roue de rayon r sur la jante de laquelle est tracé un repère T, et un manchon de rayon R dans lequel est fixée une lentille de centre optique C et de distance focale f. Écrivons que la lentille donne du repère une image qui est sur l'axe de rotation; *elle est par suite immobile* :

$$\frac{1}{R-r}-\frac{1}{R}=\frac{1}{f}, \qquad f=(R-r)\frac{R}{r}.$$

Plaçons l'œil en O : quand l'axe tourne, nous apercevons le repère

immobile, chaque fois que la lentille passe devant l'œil, *et pendant tout le temps qu'elle passe.*

Remplaçons le repère par une graduation; seule un de ses traits a son image exactement sur l'axe; par conséquent il est seul rigoureusement immobile : mais le déplacement apparent des traits voisins est insi-

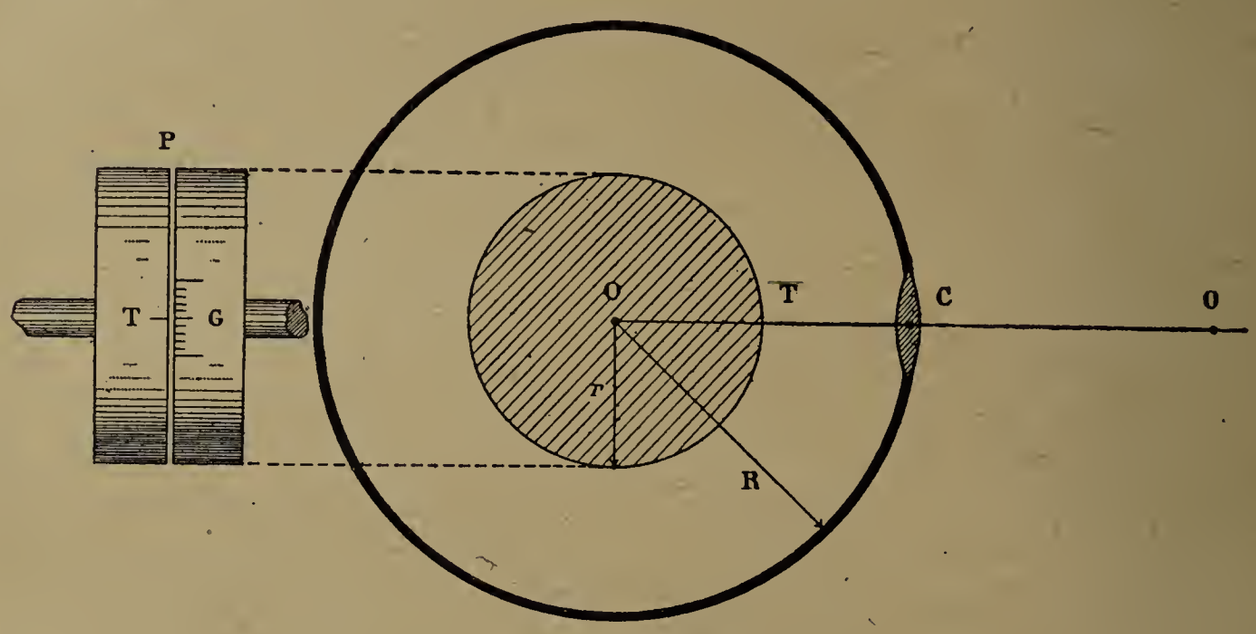


Fig. 160.

gnifiant, de sorte qu'en fait on voit immobile la portion de l'échelle voisine de la droite OC.

2° — Sur ce principe Mascart a construit un dynamomètre de transmission. L'arbre de commande est coupé en deux bouts terminés par deux poulies adjacentes P, de même rayon *r*, reliées par un système de ressorts non représenté. Sur la jante de l'une des poulies est un repère T, sur la jante de l'autre est une graduation G : le couple transmis est proportionnel à la déformation des ressorts, par suite au décalage relatif des poulies. On le mesure par le déplacement de repère par rapport à la graduation. Nous venons de montrer que c'est possible en pleine marche.

168. Phénahisticope. Cinématographe.

1° — Ces nombreux appareils se proposent de *remplacer une variation continue et une vision permanente par une variation discontinue et une vision intermittente.*

Si des objets diffèrent peu les uns des autres, apparaissent successivement pendant des temps très courts et à des intervalles très rapprochés, les impressions visuelles se lient : on doit voir sans interruption un objet qui change continûment de forme.

Quand on passe en voiture ou en marchant assez vite devant une palissade de planches mal jointes, on voit ce qui se passe derrière comme si la palissade n'existait pas (à l'intensité près, bien entendu), les vides seraient-ils aux pleins dans un rapport moindre que le vingtième.

Le *phénakisticope* consiste en un disque R vertical. Il est percé d'une

vingtaine de fentes également espacées et tourne autour d'un axe horizontal. Sur le disque sont peints de petits dessins A, B, C, D,... qui diffèrent continûment les uns des autres et représentent des états équidistants dans le temps d'un phénomène périodique assez rapide (mouvement de danse par exemple); les 20 dessins constituent une période de ce phénomène.

Le nombre des dessins est égal au nombre des fentes; ils sont disposés en regard de celles-ci, comme le montre la figure.

On place l'œil à la hauteur des fentes et derrière le disque; on

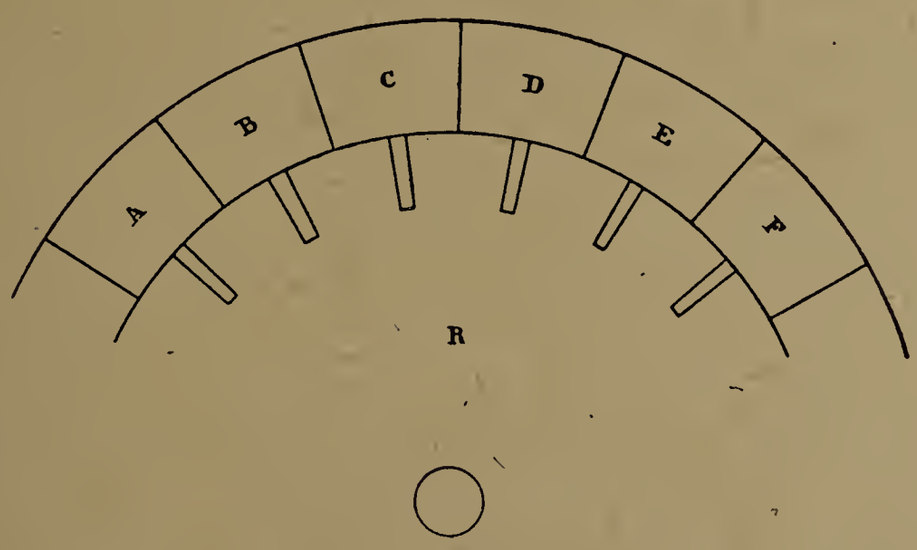


Fig. 161.

regarde les dessins par réflexion sur un miroir vertical. Quand le disque tourne, ils s'animent et exécutent le mouvement périodique choisi.

L'appareil a été varié de bien des manières.

On peut supprimer le miroir, à la condition d'employer deux disques parallèles et montés sur le même axe. On regarde à travers les fentes de l'un, les dessins tracés sur l'autre.

On peut disposer les fentes sur un tambour vertical tournant autour d'un axe vertical. Les dessins sont tracés sur la face interne du tambour. Pour plus de commodité, ils sont imprimés sur des bandes qu'on introduit dans le tambour.

Si les dessins ne sont pas en nombre égal à celui des fentes, le phénomène se déplace dans un sens ou dans l'autre. Par exemple on réprésente ainsi des hommes qui marchent.

2° — Cinéma.

Tous ces appareils sont détrônés par le *cinéma* pour la description duquel je renvoie à mon Cours sur la *Construction..... des Instruments de mesures et d'observation.*

169. **Photographie instantanée et observation visuelle.**

Les membres des animaux en mouvement ne sont nettement visibles

que périodiquement, aux instants où les mouvements changent de sens, où par conséquent la vitesse est nulle. D'autre part, même quand il s'agit de représenter des actions violentes, le bon sens nous dit qu'il ne faut pas mettre une statue, par nature immobile, dans une situation où l'équilibre *statique* ne peut manifestement exister. Quand j'allais au lycée Louis-le-Grand, je passais tous les matins devant la statue du maréchal Ney : j'avais toujours envie de lui demander gentiment si sa gorge ne lui faisait pas mal; tant il me semblait idiot de représenter un hommé « gueulant » du premier janvier à la saint Sylvestre, y compris les nuits et les dimanches.

La persistance des impressions lumineuses aidant, nous avons créé des attitudes conventionnelles que nous octroyons aux hommes et aux animaux en mouvement.

Ces attitudes n'étant pas celles que les Grecs avaient choisies et, pour les oiseaux, étant très différentes de celles que les Japonais avaient adoptées, nous pensions simplement que les Grecs et les Japonais n'y entendaient rien.

La photographie instantanée est venue chambarder nos conventions. Elle nous a montré la série des gestes *vrais* (ceux qu'on doit voir d'après le principe ci-dessus posé) parmi lesquels se retrouvent ceux des Grecs et des Japonais. En particulier les Grecs voyaient mieux que nous, parce qu'ils étaient habitués à voir des hommes nus et à juger de la perfection de leurs gestes en raison du résultat dans les jeux publics.

Courbes mobiles.

170. Déplacement varié d'une courbe unique.

1° — Une corde en vibration, noire sur fond blanc ou blanche sur fond noir dessine un espace E gris, limité (dans le cas le plus simple) par des moitiés de sinusoïde. Le gris n'est pas uniforme. Si la corde est noire sur fond blanc, le gris est plus sombre vers les bords de l'espace E, là où la corde séjourne plus longtemps; c'est l'inverse dans le second cas. L'éclairement passe par un maximum ou un minimum au voisinage de la position d'équilibre de la corde, là où sa vitesse est maxima. On répète commodément l'expérience en utilisant un cordonnet de soie noire ou blanche, entretenu par le procédé de Melde (Mécanique physique, § 476), devant une bande d'étoffe blanche ou noire.

2° — Expérience de Melville.

Agitons à la main une baguette blanche *rigide* : le secteur décrit paraît blanchâtre. Il semble limité par des baguettes plus blanches; parce qu'aux extrémités de sa course la baguette est quasi immobile.

Utilisons une baguette *flexible* qui vibre pour son propre compte. Avec une surcharge convenable, arrangeons nous de manière que sa période soit un sous-multiple petit de la période du mouvement oscilla-

toire que nous imprimons à la main. Le secteur blanchâtre paraît divisé par un grand nombre de baguettes presque aussi blanches que les extrêmes : on dirait un éventail.

Effectivement il existe une série de positions où les vitesses propres des deux mouvements vibratoires superposés sont de sens contraires : la vitesse résultante de la baguette est, sinon nulle, du moins très petite.

171. **Expériences des roues (Faraday).**

1° — Deux roues (de bicyclette, par exemple), d'un même nombre n de rayons, sont montées folles sur le même axe, l'une près de l'autre. Elles portent des poulies égales ; on leur impose des vitesses égales et de sens contraires (fig. 162).

L'œil placé devant le système dans le prolongement de l'axe, voit une roue immobile et dont le nombre des rayons est $2n$.

Supposons les rayons blancs sur fond noir ; prenons pour unité l'éclat de ce blanc. Soit α l'angle que remplit chaque rayon à une certaine distance de l'axe. Pour chaque roue l'éclat pendant la rotation est $n\alpha : 360$. En particulier si les rayons sont des cylindres, l'éclat moyen diminue du centre à la périphérie.

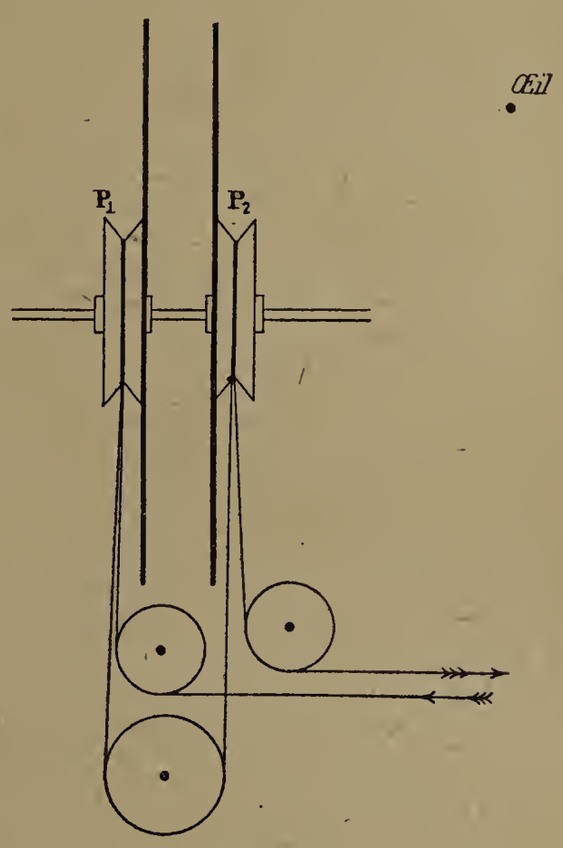


Fig. 162.

Les roues tournant simultanément, l'éclat moyen est égal à $2n\alpha : 360$, *excepté aux points où les rayons se superposent, points pour lesquels l'éclat est moitié moindre.* En effet, pour ces points, les rayons étant opaques, seul celui qui est du côté de l'œil, joue le rôle de source lumineuse.

2° — Reste donc à déterminer le nombre des droites pour lesquelles la superposition a lieu. Partons d'une position pour laquelle l'œil voit les rayons superposés, ce qui définit n direction. Les roues marchant en sens inverses avec des vitesses égales, il y a encore superposition quand elles ont tourné de la moitié de l'angle que font entre eux deux rayons adjacents de la même roue : ce qui définit n nouvelles directions. D'où $2n$ directions *fixes* qui apparaissent en sombre sur fond plus éclairé. Elles apparaissent en clair sur fond plus sombre, si les rayons sont noirs sur fond blanc.

Les $2n$ directions sont fixes quand les vitesses des roues sont exactement égales. Sinon les $2n$ rayons visibles tournent dans un sens ou

dans l'autre avec une vitesse croissante à mesure que les vitesses des roues diffèrent davantage.

Je laisse au lecteur le soin de discuter ce cas.

3° — On obtient des vitesses rigoureusement égales et de sens contraires de bien des manières.

Par exemple, on utilise une roue *à couronne*. Elle est constituée par un disque de bois horizontal sur le pourtour duquel on cloue (par exemple) huit petits cylindres de bois équidistants et normaux à son

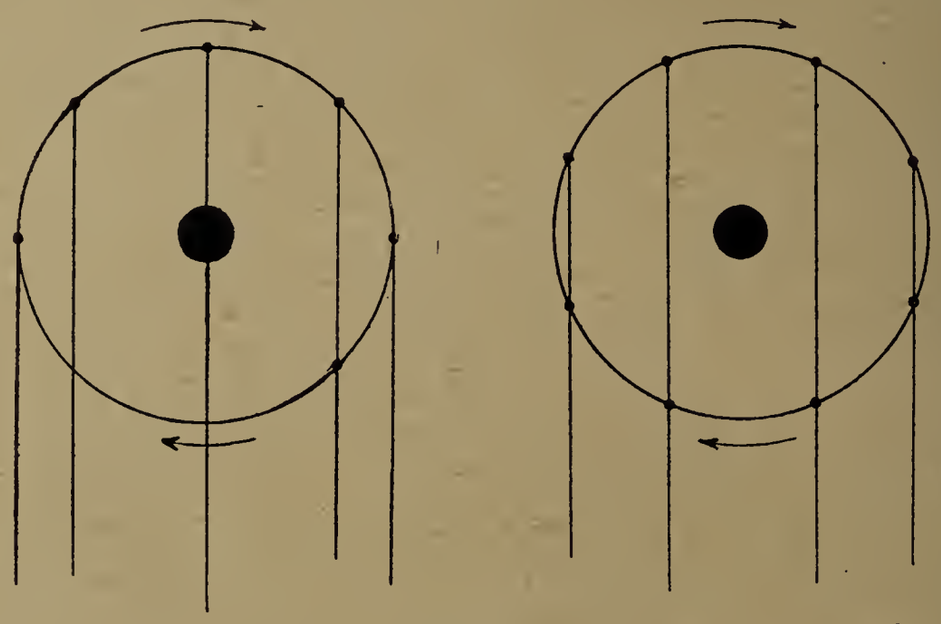


Fig. 163.

plan. On les peint en noir; on fait tourner la roue autour d'un axe vertical devant un carton blanc; on observe en plaçant l'œil assez loin dans le plan du disque.

Quand la roue tourne, on aperçoit un nombre de tiges immobiles que je laisse au lecteur le soin de déterminer.

La figure 163 représente les deux azimuts du disque pour lesquels la superposition des projections a lieu.

4° — Billet donne à l'expérience une forme curieuse.

Il s'agit de voir les gouttes d'une veine liquide. Il la fait couler devant un grand miroir sphérique vertical, de manière qu'elle passe par son centre de courbure. Le miroir en donne sur la même verticale une image égale et renversée, par suite animée vers le haut de la vitesse que possèdent les gouttes vers le bas. En éclairant fortement, on voit les gouttes distinctes et immobiles.

172. **Courbes tournantes.**

1° — Le nombre des phénomènes analogues est considérable; ils entrent dans l'énoncé suivant.

Deux lignes *brillantes*, L_1 et L_2 droites ou courbes, tournent rapidement dans des plans parallèles voisins; leurs vitesses angulaires sont entre elles dans un rapport simple. L'œil placé devant le système

distingue, dans l'espèce de gaze que semble produire le mouvement des lignes, l'image immobile d'une troisième courbe I *plus sombre* que le fond sur lequel elle se dessine. Cette courbe I est le lieu des points d'intersection apparents des lignes en mouvement.

Pour répéter les expériences, on utilise (fig. 162) deux poulies P_1 et P_2, folles sur le même axe (ou sur des axes parallèles), entraînées par un cordon sans fin mû par une poulie montée sur le moteur. Sur P_1 on dessine la courbe L_1 en blanc sur fond noir. Sur P_2 on fixe un disque de verre ou de celluloïd transparent sur lequel on dessine en blanc la courbe L_2.

La figure suppose pour les poulies un axe commun; on réalise aisément le cas plus général et plus intéressant des axes parallèles qui ne sont pas dans le prolongement l'un de l'autre.

L'œil est toujours assez loin pour que les disques puissent être considérés comme tournant dans un même plan.

2° — On modifie le rapport des vitesses en changeant les poulies. Du reste il n'est pas nécessaire, ni même avantageux de réaliser exactement le rapport simple. Si par exemple au lieu d'être égales, les vitesses sont comme 99 et 100, on obtient successivement les phénomènes qui correspondent à l'égalité des vitesses et à tous les décalages relatifs des deux poulies; absolument comme dans les expériences de Lissajous (§ 165), on obtient successivement toutes les formes possibles de l'ellipse résultante, quand les périodes des diapasons ne sont pas strictement égales.

Quand les axes coïncident, le changement de forme se réduit à une rotation lente autour de l'axe commun. Quand les axes ne coïncident pas, le lieu des intersections change de forme.

Exemple simple : les courbes L sont des droites passant par les axes et tournant en sens contraires avec des vitesses quasi égales. La courbe I est une hyperbole si les axes ne coïncident pas (Ex. de Math., § 435). Elle se déforme peu à peu; comme cas particulier, on obtient deux droites. Si les axes coïncident, on retombe sur l'expérience de Faraday : la courbe I se réduit à deux droites rectangulaires qui tournent lentement.

3° — L'explication du phénomène est celle du paragraphe précédent.

A chaque instant, pour tous les points d'intersection apparente, l'œil ne reçoit de lumière que de la ligne de devant, puisqu'elle est opaque et intercepte la lumière envoyée par la ligne d'arrière. Les points d'intersection apparaissent donc en sombre. *La continuité du lieu de ces points (courbe d'intersection) est due à la persistance des impressions lumineuses.*

Si les vitesses sont dans un rapport simple $m : n$, où m et n sont des entiers *petits*, le phénomène est immobile, puisque après n tours de l'une des lignes et m de l'autre, les positions sont restituées.

On dira que pratiquement le rapport *quelconque* des vitesses peut être mis sous la forme $m : n$ où m et n sont des *entiers*. Mais, si m et n sont grands, la période du phénomène total devient si grande que nous ne le voyons pas simultanément dans son entier. La durée des impressions

devenant insuffisante, les diverses parties de la courbe nous apparaissent successivement : *c'est ce que nous appelons la déformation de la courbe I.*

On réalise les mêmes phénomènes, en prenant noire la courbe antérieure : la courbe d'intersection I est alors *complètement* noire sur fond gris.

Mêmes phénomènes encore en prenant pour courbe antérieure une fente percée dans du papier noir : la courbe I est alors grise sur fond noir.

173. **Anorthoscope.**

1° — Choisissons pour une des lignes mobiles une fente rectiligne percée dans un cercle noir. Donnons-nous la courbe d'intersection I. Cherchons quelle doit être alors l'autre courbe mobile, pour un rapport

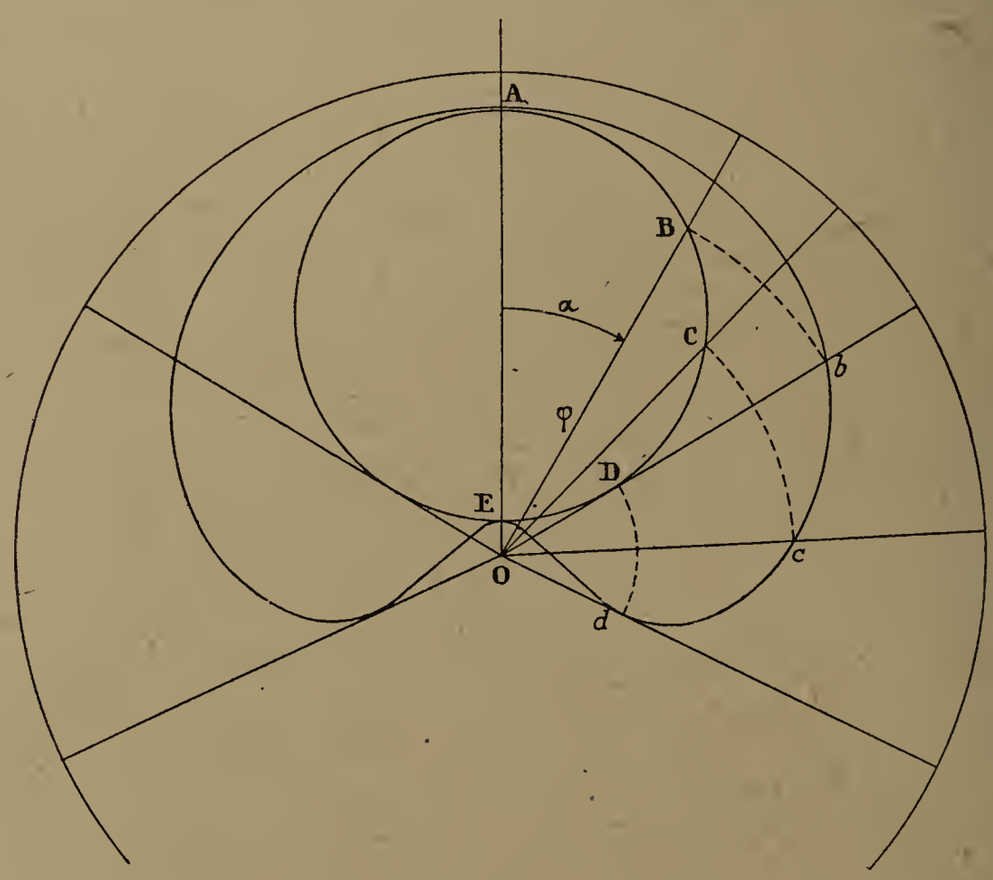


Fig. 164.

donné des vitesses, par exemple pour des vitesses égales et de sens inverses. Nous trouverons (le plus simplement possible par une construction graphique) une figure difforme qui, tournant dans des conditions déterminées derrière la fente mobile, reproduira l'image régulière choisie I (tête, homme, mot, ...). C'est un nouveau genre d'anamorphoses. La figure difforme peut ne pas se réduire à un simple trait; elle peut être entièrement coloriée pourvu qu'elle se détache sur un fond noir. On la dessinera sur du papier transparent qu'on éclairera par l'arrière.

2° — Vitesses de sens inverses.

Fixons les idées par un exemple simple (fig. 164).

La courbe I qu'on doit voir, est un cercle ABCD... La fente tourne dans le sens des aiguilles d'une montre avec une vitesse constante; le dessin A*bcd*... tourne en sens inverse avec la même vitesse.

Cherchons quel doit être ce dessin.

Dans la position initiale, au temps origine, la fente est en OA. Les points du dessin sont donc A et E.

Quand la fente vient en OB, il faut que l'une de ses intersections avec le dessin soit le point B. Mais le dessin a tourné du même angle AOB en sens inverse. Donc à l'origine des temps, le point qui apparaît en B quand la fente est en OB, devait être en *b* tel que, le rayon vecteur restant le même, l'angle AO*b* soit double de AOB. Et ainsi de suite.

Le lecteur vérifiera immédiatement que si la courbe à obtenir α pour équation polaire $\rho = f(\alpha)$, la courbe qu'il faut tracer a pour équation polaire $\rho = f(\alpha : 2)$. C'est la première courbe dont les angles ont été dilatés dans le rapport de 1 à 2.

D'une manière générale, soit V la vitesse angulaire de la fente, soit v celle du dessin déformé qui est par hypothèse de sens contraire.

Pour passer de la courbe à obtenir au dessin déformé, il faut dilater les angles dans le rapport de :

$$R = \frac{V + v}{V} = 1 + \frac{v}{V}.$$

La courbe qu'il faut tracer a pour équation polaire : $\rho = f(\alpha : R)$.

Il faut que le quotient $v : V$ soit un nombre entier pour que la figure soit immobile.

Le lecteur vérifiera aisément qu'à raison de la persistance des sensations lumineuses, on aperçoit simultanément R figures identiques, symétriquement distribuées autour du centre.

Dans le cas étudié ci-dessus, il en existe 2.

Si l'on veut que les dessins réguliers soient complètement séparés, il faut qu'ils occupent un angle inférieur à $2\pi : R$.

Enfin le lecteur vérifiera qu'on peut, sans rien changer au résultat, percer $R - 1 = v : V$, fentes équidistantes.

3° — Vitesses de même sens.

Je laisse au lecteur le soin de discuter ce cas; les raisonnements sont identiques au précédent. D'une manière générale, V représentant toujours la vitesse angulaire de la fente, v celle du dessin déformé, on passe de la courbe à obtenir à la courbe déformée en conservant les mêmes rayons vecteurs et en dilatant les angles dans le rapport :

$$R = 1 - \frac{v}{V}.$$

Si $v < V$, le rapport est positif et < 1; la dilatation angulaire est une véritable contraction. A la limite pour $v = 0$, le dessin à obtenir

est identique au dessin déformé. Le lecteur reprendra le cas du cercle ci-dessus traité; il fera par exemple $V = 2v$, $R = 0{,}5$ et raisonnera sur cet exemple numérique.

Si $v > V$, le rapport est négatif : le dessin doit être construit comme si le rapport était positif; puis il faut en prendre le symétrique par rapport à la position initiale de la fente.

Remarque.

On suppose toujours que les disques font simultanément des nombres entiers de tours; à cette condition seulement les figures sont immobiles. Si la condition n'est pas *rigoureusement* réalisée, on obtient encore la courbe régulière; *mais elle tourne lentement.*

Avec une corde sans fin unique passant sur des poulies (§ 172) on est toujours dans ce dernier cas. Pour avoir un rapport de vitesses rigoureusement défini, il faut employer des engrenages.

174. Roue tournant derrière une palissade.

1° Le problème des courbes tournantes (§ 172) admet comme cas particulier la translation de l'une des courbes : c'est le problème classique de la *roue passant derrière une palissade.*

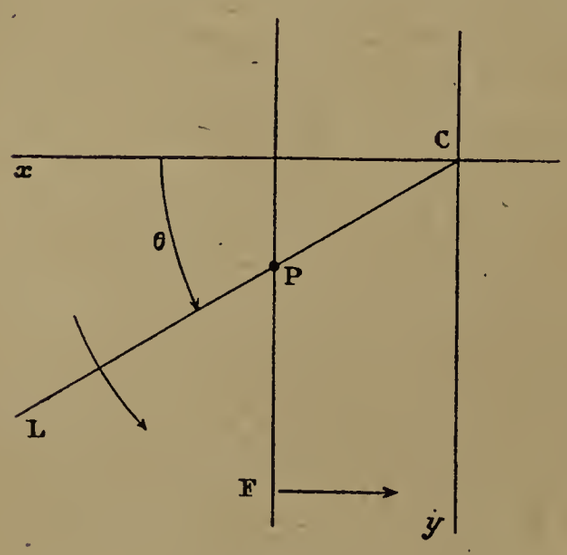


Fig. 165.

Les rayons paraissent courbes; la figure 165 *bis* montre ce qu'ils deviennent.

Comme instinctivement l'œil fixe le centre de la roue, que par suite il ne s'agit que de mouvements relatifs, nous ramenons immédiatement le problème à cet autre : *Une droite lumineuse L tourne d'un mouvement uniforme autour d'un point fixe C : déterminer le lieu de son intersection P avec une fente F qui se déplace parallèlement à elle-même avec une vitesse constante* (fig. 165).

C'est dans sa généralité le problème de la *Quadratice de Dinostrate* (Exercices de mathématiques générales, § 349).

Les équations du lieu cherché sont (avec les signes spécifiés sur la figure 165) :

$$\theta = \theta_0 + 2\pi \frac{t}{T}, \qquad x = -a\frac{t}{T};$$

$$y = x \operatorname{tg}\theta, \qquad y = x \operatorname{tg}\left(\theta_0 - \frac{2\pi x}{a}\right).$$

Le faisceau des courbes, représenté par la figure 165 *bis* et plus complètement par la figure 165 *ter*, admet pour paramètre variable l'angle θ_0 ; il correspond donc à des rayons différents de la roue.

L'angle θ_0, détermine l'azimut de ces rayons quand $x = 0$, c'est-à-dire quand la fente mobile coïncide avec le centre du cercle.

Le faisceau de courbes reste le même si on remplace x par $x + ka : 2$, où k est un nombre entier quelconque; l'argument de la tangente change alors d'un nombre quelconque de fois π.

2° — La courbure apparente des rayons dépend du rapport des vitesses de translation et de rotation, rapport mesuré par la longueur a dont se déplace la fente pendant que la droite fait un tour. Dans le cas

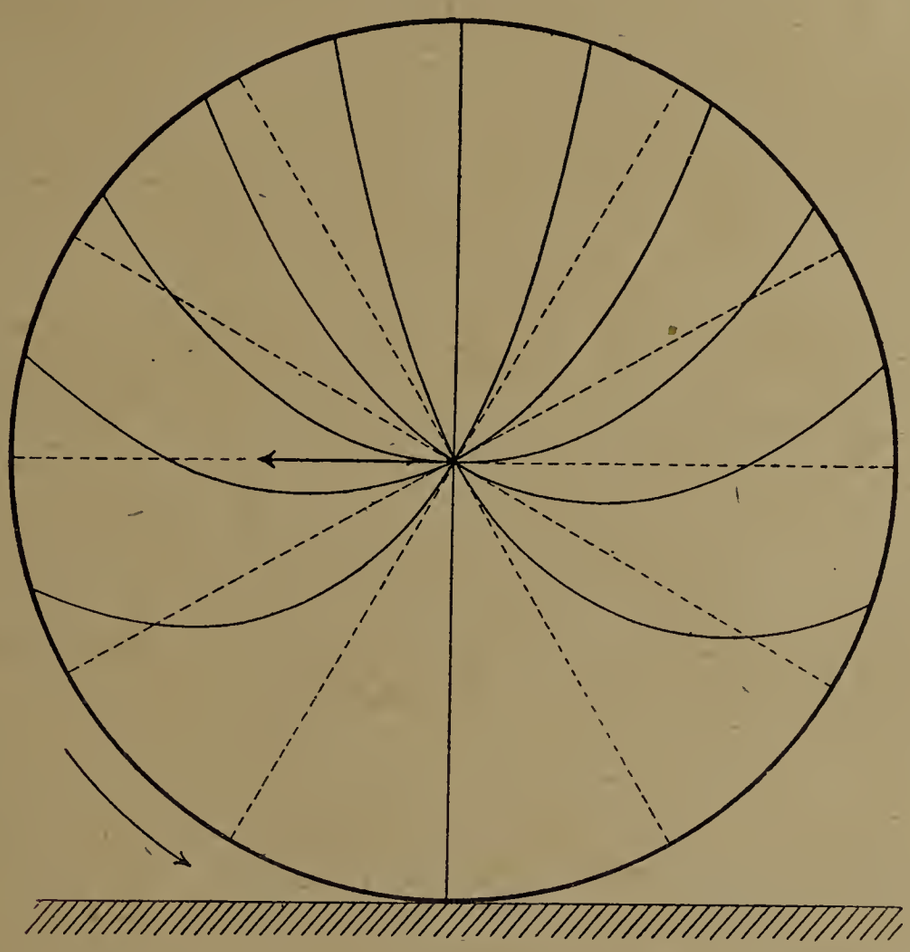


Fig. 165 *bis*.

de la roue roulant sur le sol, $a = 2\pi R$; R est le rayon de la jante. D'où résulte que la courbure apparente des rayons ne dépend pas de la vitesse de la roue.

Cependant on ne peut la reconnaître que si la vitesse est comprise entre deux certaines limites qui dépendent de R.

Pour réaliser l'expérience, on emploiera par exemple un disque noir sur lequel on tracera en blanc la jante et un ou plusieurs rayons. On le fera rouler derrière une palissade formée de planches noircies laissant entre elle les fentes F. Augmenter le nombre des rayons ou des fentes modifie seulement le nombre des courbes visibles à la fois; en vertu de la théorie précédente, ce nombre est égal au produit du nombre des rayons par le nombre des fentes sur lesquelles se projette la roue à chaque instant. Dans l'espace absolu, le lieu des intersecteurs d'un rayon et d'une fente est évidemment cette fente même; mais n'oublions

pas que, par hypothèse, la ligne visuelle tourne d'un mouvement continu, de manière à passer constamment par le centre de la roue, ou par le point de contact Γ de la jante avec le sol. Conséquemment le phénomène est plus net si l'on facilite le déplacement régulier de la ligne visuelle, en particulier, si l'on rend visible le point Γ au bas de la palis-

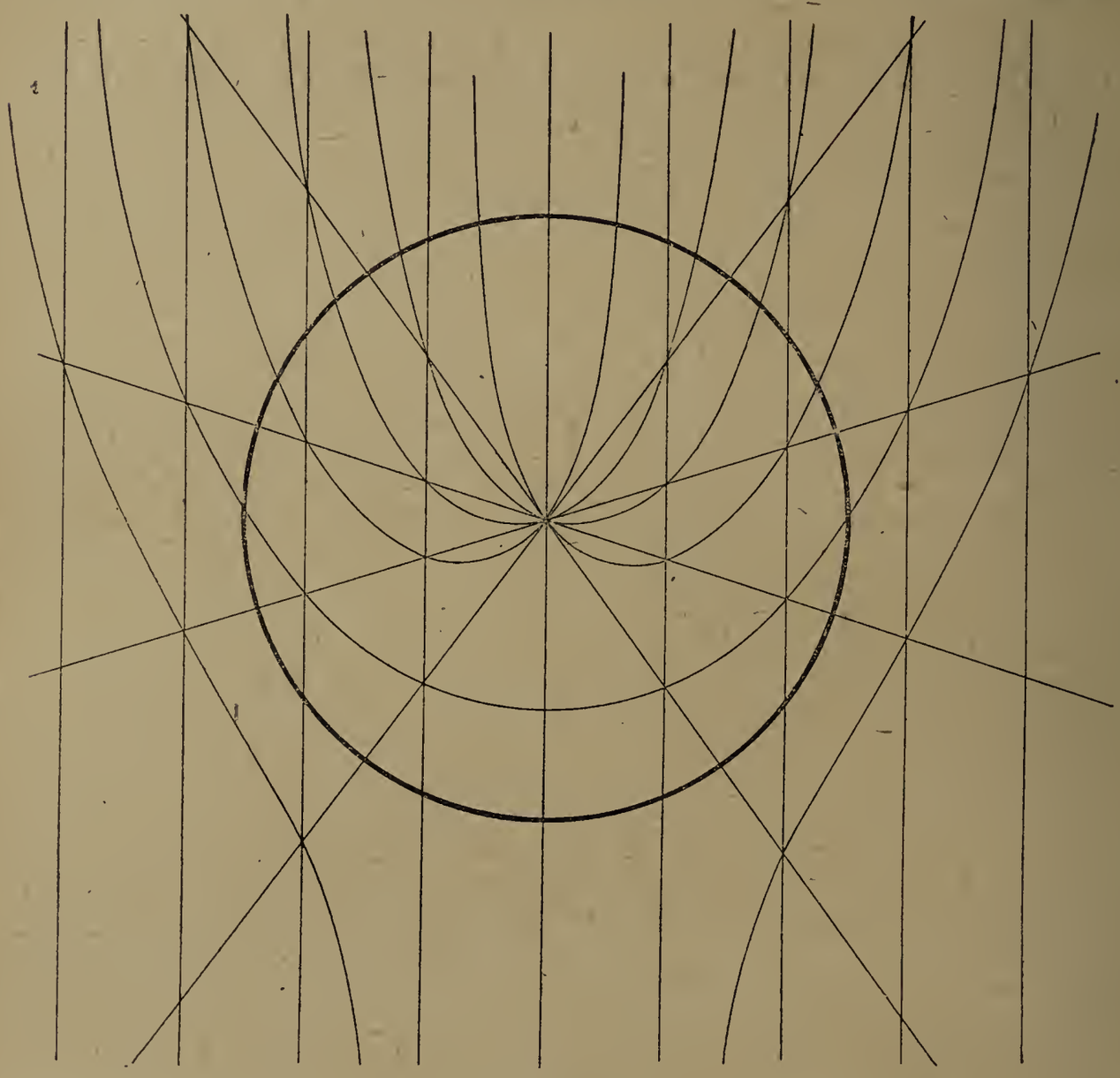


Fig. 165 *ter*.

sade. Il est clair que si inversement on fixe une fente, on voit simplement le point d'intersection du rayon et de la fente se déplacer verticalement.

175. **Expérience de Zöllner.**

Je la rapproche de l'anorthoscope à cause de la similitude des techniques, bien qu'il s'agisse d'une illusion d'optique.

Sur du carton blanc, on trace un cercle noir de 5 centimètres de diamètre, par exemple. Dans du carton noir on découpe une longue fente rectiligne, large de 5 millimètres, par exemple. Derrière le carton noir maintenu immobile et dont la fente est horizontale, on fait osciller

verticalement le carton blanc. Le cercle apparaît comme une *ellipse* dont le grand axe est horizontal. Il faut naturellement que l'oscillation ne soit pas trop rapide, auquel cas on ne voit plus le cercle.

Pour que le cercle apparût comme un cercle, il faudrait que la ligne visuelle fût animée d'un mouvement oscillatoire qui la fasse passer constamment par le même point de ce cercle, le centre par exemple. L'illusion provient de ce que l'œil est en retard sur le mouvement du cercle : l'amplitude de son oscillation est plus petite qu'il ne faudrait.

Lorsque le cercle passe *très lentement* derrière la fente, le cercle paraît comme une ellipse dont le grand axe est vertical.

176. Expériences avec des cordes rectangulaires ; expériences avec des fils.

1° — Tendons, à 1 ou 2 centimètres l'une de l'autre, 2 cordes horizontales rectangulaires, noires sur fond blanc par exemple.

Amenons-les approximativement à l'unisson.

Lançons-les simultanément *avec des archets*. En plaçant l'œil au-dessus de la partie moyenne commune des cordes, on distingue un parallélogramme dont le trait est parfaitement net. Sa forme se modifie lentement; périodiquement il se réduit à deux droites. Si les cordes sont noires sur fond blanc, le trait polygonal apparaît en clair sur fond obscur. Il apparaît en sombre sur fond brillant, si les cordes sont enduites d'or battu et disposées devant du papier noir.

Les parties des cordes qui se trouvent l'une sous l'autre, étant voisines du milieu, on peut admettre qu'elles se déplacent parallèlement à elles-mêmes. Pour l'unisson les coordonnées des points des cordes ayant à chaque instant même projection horizontale, satisfont aux équations :

$$x = f(t), \qquad y = kf(t+\tau),$$

où τ est la phase. Comme la courbe, $y = \varphi(x, \tau)$, se compose de droites (parallélogramme), il faut conclure que les vitesses des points de chaque corde est constante pendant un certain temps, puis qu'elle varie brusquement.

L'expérience est conforme à la théorie des §§ 487 et suivants de ma Mécanique Physique. Le son rendu par la corde n'est pas simple.

2° — Si l'on s'arrange de manière que les cordes donnent un son simple, ce qui exige que les oscillations de leurs points soient pendulaires, le lieu des intersections est une ellipse pour l'unisson.

Si l'unisson n'est qu'approché, l'ellipse se déforme.

3° — La méthode se généralise.

On attache au corps vibrant un petit fil d'acier noirci de faible diamètre. On s'arrange pour que les fils supportés par les deux diapasons, verges, plaques,... dont on veut composer les vibrations, aient des oscillations rectangulaires et dans des plans voisins. On regarde avec un microscope peu grossissant les fils se détachant sur fond

éclairé. Le lieu des points d'intersection est une courbe caractéristique de l'intervalle, comme dans les expériences de Lissajous.

177. Illusion d'optique.

Le lecteur construira une figure analogue à celle de la figure 166 en supprimant toutes les lignes droites. Il la placera sur une table horizontale. Il mouillera son doigt, l'appliquera sur le point C et donnera à la figure un mouvement *de translation circulaire.* C'est dire qu'il maintiendra une droite AB tracée sur le dessin dans une direction à peu près invariable et fera décrire au bout de son doigt un cercle (de centre O, par exemple).

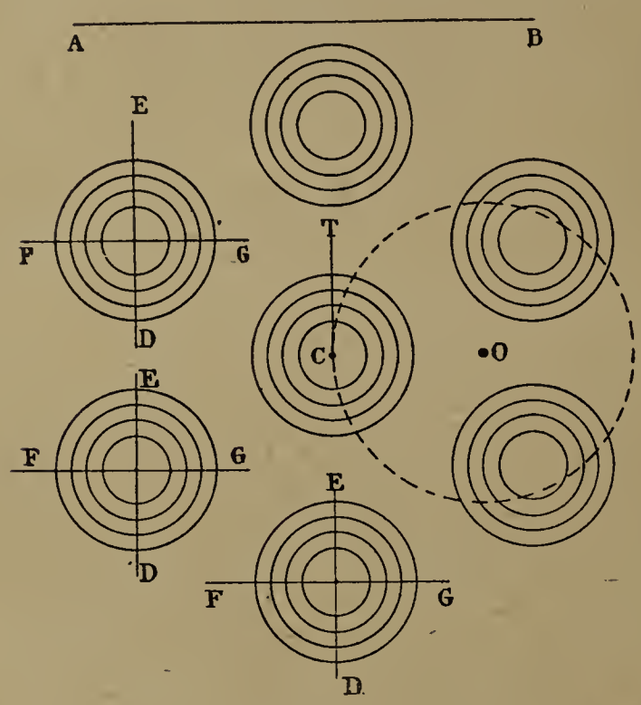


Fig. 166.

Les petits cercles lui paraîtront alors animés d'un mouvement de rotation.

L'explication du phénomène est la suivante.

Lorsque le dessin se meut suivant CT, les parties des circonférences voisines du diamètre FG restent nettes parce que le déplacement leur est parallèle; les parties voisines du diamètre ED deviennent floues, parce que le déplacement leur est normal. Pendant la translation circulaire, la position des arcs nets et flous sur les circonférences varie d'un instant à l'autre d'une manière continue. D'où la création d'une sorte d'index tournant sur les circonférences; d'où l'illusion de leur rotation.

Moiré.

Je place ici l'étude du moiré, non que la persistance des impressions lumineuses y intervienne particulièrement, mais parce qu'il s'agit d'intersections de courbes.

178. Première espèce de moiré.

1° — Considérons un faisceau de courbes :

$$f(x, y) = s, \qquad (1)$$

où s est le paramètre dont la valeur caractérise la courbe considérée : le nombre des courbes du faisceau est infini.

Parmi toutes ces courbes, distinguons en deux faisceaux F et Φ, formés de courbes distinctes les unes des autres :

$$s = f(t), \qquad s = \varphi(\tau).$$

Nous posons que t et τ sont des nombres entiers.

Traçons ces deux faisceaux sur du papier transparent; à travers le papier, regardons un fond uniformément éclairé. Nous créons ainsi un phénomène périodique, présentant ce qu'on peut appeler des *franges d'interférence*. Au voisinage de certaines valeurs s_1, s_2, s_3, du paramètre s, les courbes sont *plus resserrées*; *en raison de leur épaisseur*, elles se superposent plus ou moins : la lumière transmise est donc *plus grande*. Au voisinage des valeurs intermédiaires du paramètre s, les courbes sont plus *uniformément réparties;* elles ne se recouvrent pas : la lumière transmise est *plus petite*.

2° — Le phénomène précédent se produit, par exemple, quand on regarde normalement deux grilles planes identiques, à barreaux paral-

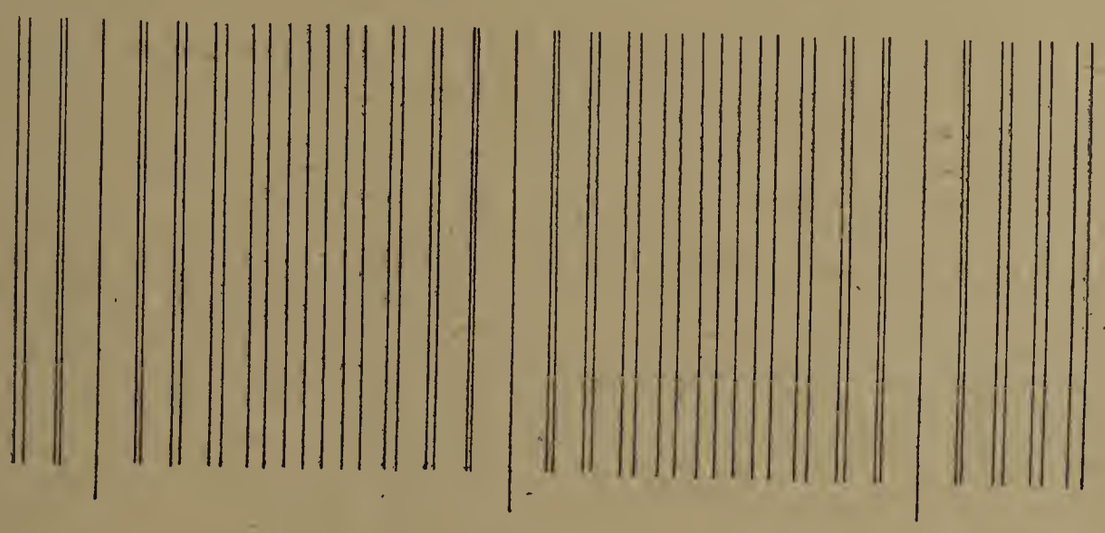


Fig. 167.

lèles, situées dans des plans parallèles (comme deux garde-fous de pont). Les deux grilles se projettent sur un même plan comme deux faisceaux de droites épaisses, parallèles, équidistantes, mais dont l'équidistance n'est pas la même en raison de l'inégalité des distances des grilles à l'observateur. Nous avons le faisceau de courbes :

$$x = s, \qquad (1')$$

avec les conditions : $s = \alpha t$, $s = \beta\tau$;

α et β sont des nombres peu différents; les paramètres t et τ sont la suite des nombres entiers.

La figure 167 représente la superposition des deux faisceaux de droite pour $\alpha = 1{,}0$ et $\beta = 1{,}1$.

On supposera aux traits une épaisseur plus grande; on ne l'a pas donnée pour rendre la figure plus intelligible.

Multiplions les nombres α et β par la puissance 10^n de 10 la plus petite qui les rende entiers. Il est clair que la période est de $t = 10^n \beta$, intervalles du premier faisceau, et de $\tau = 10^n \alpha$ intervalles du second.

Dans le cas de la figure, la période est de 11 intervalles du premier faisceau et de 10 du second.

3° — Le lecteur construira aisément une figure avec des cercles concentriques.

Dans l'étude des interférences (anneaux de Newton), nous trouverons réalisé le cas : $\rho = s$,

avec les conditions : $s = \alpha\sqrt{t}$, $s = \beta\sqrt{\tau}$;

ρ est le rayon des cercles; les paramètres t et τ sont la suite des nombres entiers.

179. Seconde espèce de moiré.

1° — Nous n'avons plus comme précédemment deux faisceaux de courbes *distinctes* faisant rigoureusement partie du même faisceau *continu* : les courbes de nos deux faisceaux sont seulement assujetties à se couper sous de petits angles, de manière à se confondre encore le long d'un petit élément voisin de l'intersection géométrique, cela en raison de leur épaisseur qui n'est pas nulle.

Soit deux faisceaux :

$$f(x, y) = F(t), \qquad \varphi(x, y) = \varphi(\tau), \qquad (1)$$

dans lesquels nous ne gardons que les courbes dont les paramètres caractéristiques t et τ sont entiers (fig. 168). Elles forment une sorte de quadrillage curviligne. Les courbes diagonales de ces quadrilatères sont définies par la constance des quantités :

$$\mu = t - \tau, \quad \nu = t + \tau. \quad (2)$$

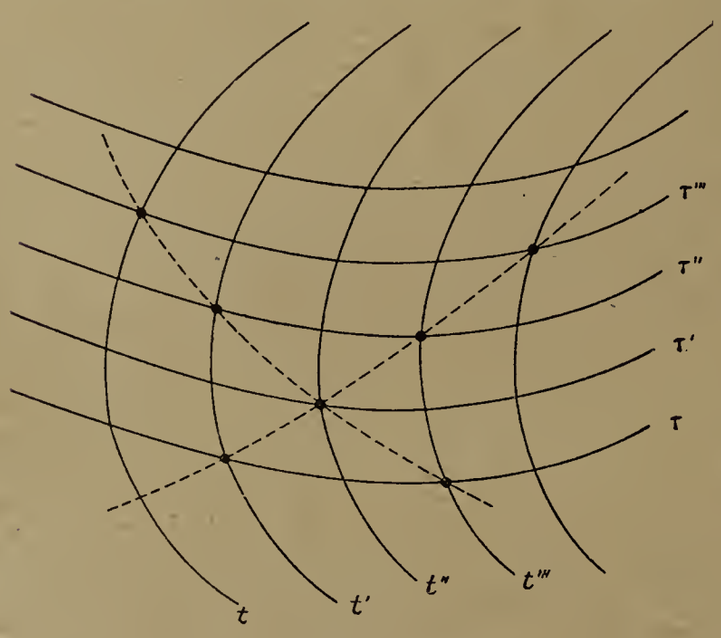


Fig. 168.

Entre les équations (1) et l'une des équations (2), éliminons t ou τ; nous obtenons deux faisceaux de courbes (3). Dans le cas général, elles ne présentent rien de particulier. Mais si les courbes (1) se coupent sous de très petits angles, celui des faisceaux (3) qui correspond aux petites diagonales des quadrilatères curvilignes, donne les courbes médianes d'un système de franges constituant le *moiré de seconde espèce.*

2° — Il est facile de voir le phénomène en question avec un morceau de canevas, de mousseline, de tulle, de toile métallique, qu'on replie d'une manière quelconque, qu'on éclaire uniformément par derrière et qu'on regarde d'une distance assez grande pour s'accommoder à la fois sur les deux surfaces. Comme il y a deux systèmes de fils, il y a deux systèmes de franges. Les courbes f et φ sont les projections des fils sur un plan normal à la ligne visuelle moyenne.

180. Systèmes de droites respectivement parallèles.

1° — Considérons les deux faisceaux de droites respectivement parallèles :

$$x\cos\theta + y\sin\theta = bt + ct^2, \qquad x\cos\theta - y\sin\theta = b\tau - c\tau^2. \quad (1)$$

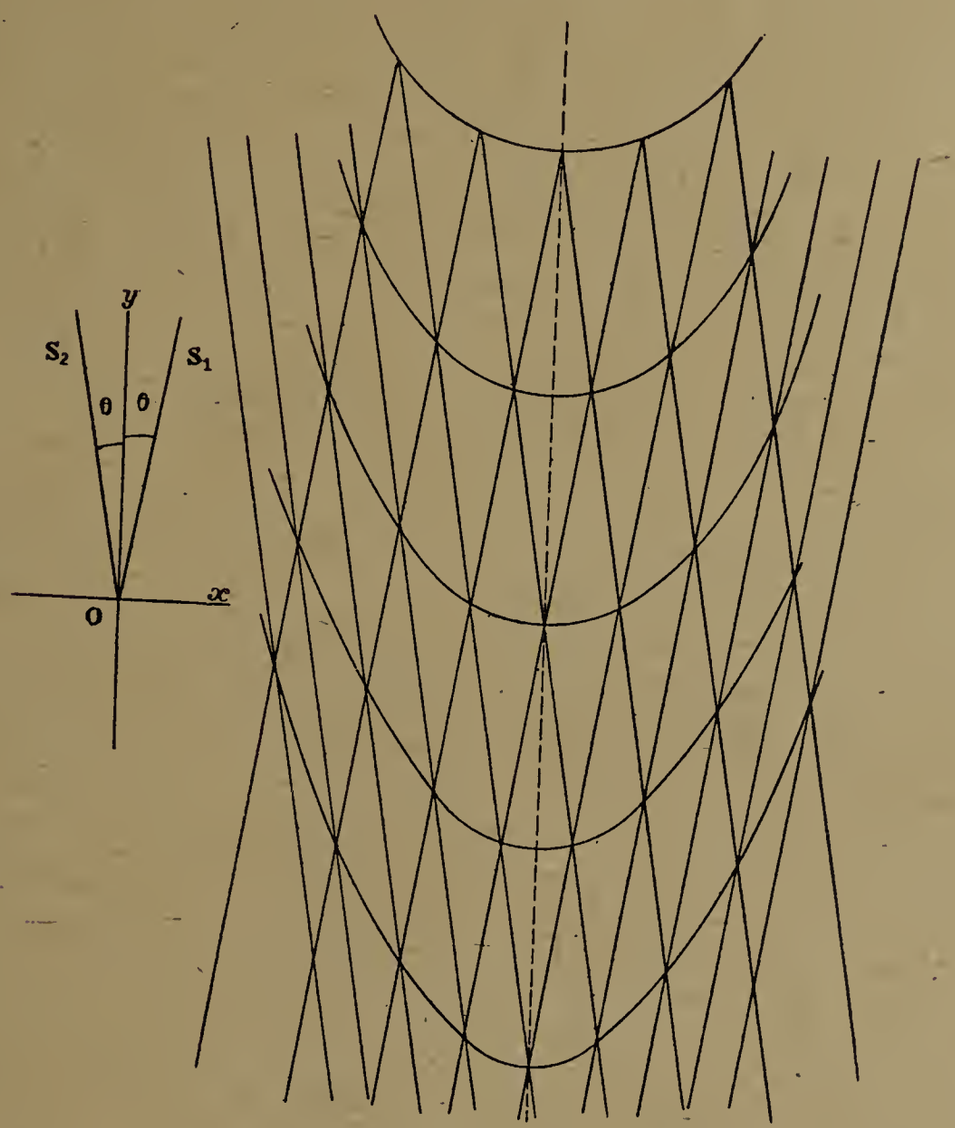


Fig. 169.

Pour $t = \tau = 0$, nous avons les deux droites OS_2 et OS_1; elles font évidemment le même angle θ avec l'axe Oy.

Les courbes lieu des points d'intersection, qui correspondent aux petites diagonales des parallélogrammes, satisfont à la condition :

$$t - \tau = \mu = \text{constante}.$$

Additionnons et retranchons les équations (1) :

$$2x\cos\theta = (b + c\mu)(t + \tau).$$
$$2y\sin\theta = b\mu + c(t^2 + \tau^2) = b\mu + c(\mu^2 + 2t\tau).$$

Pour parfaire l'élimination, on s'appuyera sur la relation :

$$(t + \tau)^2 - 4t\tau = \mu^2.$$

D'où :
$$\frac{4x^2\cos^2\theta}{(b + c\mu)^2} - \frac{4y\sin\theta}{c} + \frac{2b\mu}{c} + \mu^2 = 0. \quad (2)$$

Les courbes cherchées sont donc des paraboles qui ont Oy pour axe commun.

Leurs sommets sont aux points :

$$y = \frac{\mu(2b + c\mu)}{4 \sin \theta}. \qquad (3)$$

2° — En pratique le paramètre c étant très petit devant b, les équations se simplifient. L'équation (2) devient :

$$\frac{4c \cos^2 \theta}{b^2} x^2 - 4y \sin \theta + 2b\mu = 0.$$

C'est la même parabole pour toutes les valeurs de μ glissant parallèlement à Oy. Les sommets sont aux points :

$$y = \mu b : 2 \sin \theta. \qquad (4)$$

Le rayon de courbure au sommet de la parabole est :

$$R = \frac{b^2}{2c} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta}.$$

Si les droites parallèles sont équidistantes ($c = o$), les paraboles deviennent des droites (4); autrement dit, leur rayon de courbure au sommet devient infini.

3° — Pour faire l'expérience on trace à l'encre de Chine sur une feuille de papier 51 traits parallèles, longs de 20 centimètres (par exemple), et dont la distance les uns aux autres croît (de 2 mm. pour les deux premiers, à 3 mm. pour les deux derniers) suivant la formule :

$$s = 2t + 0{,}01 \,.\, t^2.$$

On photographie en réduisant à la moitié ou au quart. On fait deux diapositifs. On réalise le phénomène en les appliquant l'un contre l'autre après retournement de l'un d'eux.

4° — Le lecteur recommencera les calculs pour les deux faisceaux de droites :

$$x \cos \theta + y \sin \theta = bt + ct^2, \qquad x \cos \theta - y \sin \theta = b\tau + c\tau^2.$$

On trouve des paraboles d'équation :

$$4y^2 \sin^2 \theta - 4c\mu^2 x \cos \theta = b^2\mu^2 - c^2\mu^3$$

L'une de ces paraboles est l'axe des x.

Les autres admettent l'axe des x pour axe.

Les clichés précédents servent encore à vérifier le résultat du calcul; mais il ne faut plus retourner l'un d'eux.

Applications photométriques du principe de Talbot.

181. Procédés mécaniques pour obtenir en marche le décalage de deux roues montées sur le même axe.

Avant de parler des applications photométriques du principe de

Talbot, résolvons le problème mécanique suivant : *obtenir le décalage des deux roues S_1 et S_2 montées sur le même axe tournant.*

1° — Première solution.

Sur l'axe tournant AA, sont montées : invariablement la roue S_1,

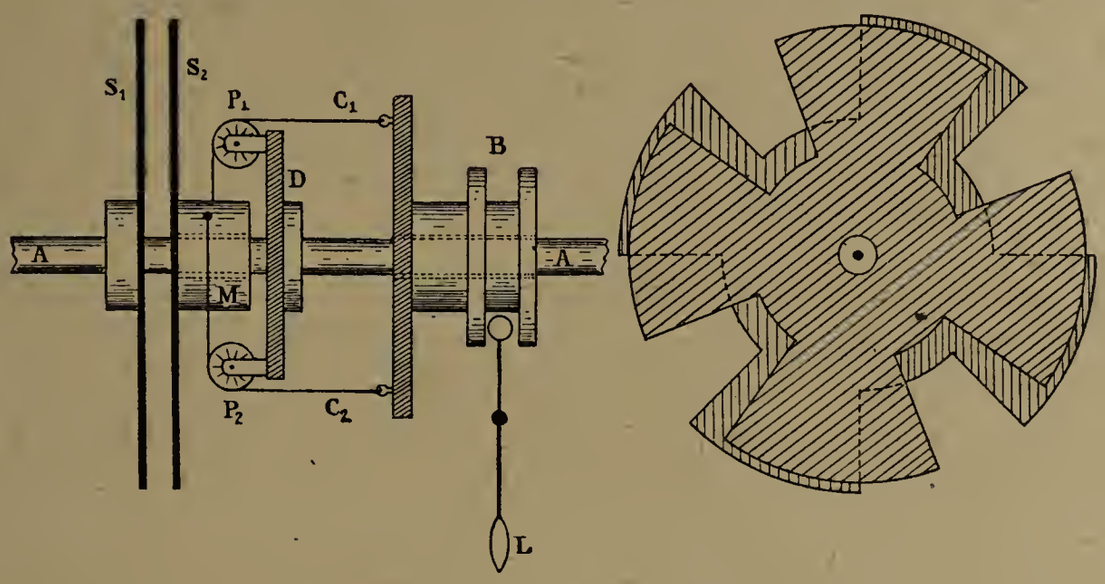


Fig. 170.

folle la roue S_2. La pièce D est solidaire de l'axe. La pièce B glisse sur l'axe : elle se déplace librement le long de l'axe, mais est entraînée par lui. On détermine sa position sur l'axe au moyen du levier L dont l axe est fixe.

Un ressort spiral R (non représenté) entraîne la roue S_2 dans un sens ;

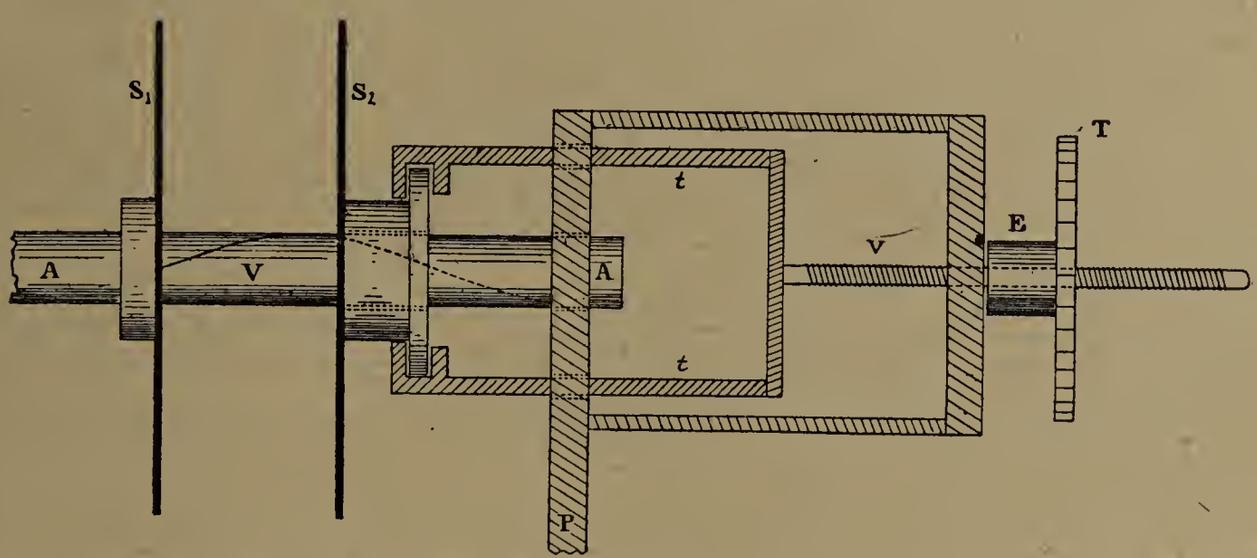


Fig. 171.

elle est maintenue dans sa position actuelle par deux cordons C_1, C_2, fixés à la pièce B, passant sur les poulies P et s'enroulant sur un manchon M solidaire de S_2. Le plan des poulies ne passe pas par l'axe ; elles devraient être figurées elliptiques.

Le ressort R maintient les cordons tendus.

Agissons sur le levier L, ce qui est possible en pleine marche. La

pièce B se déplace sur l'axe, entraînant les cordons qui agissent sur le manchon M et font tourner S_2 par rapport à S_1 solidaire de l'axe.

2° — Second procédé.

L'arbre mobile AA porte une fraction de pas d'une vis V de très long pas.

La roue S_1 est solidaire de l'arbre; la roue S_2 sert d'écrou à la vis V. Son azimut relatif par rapport à S_1 est donc fonction de sa distance à S_1. On la modifie en agissant sur la vis V au moyen de la tête divisée T. La pièce P, fixe, sert à la fois de coussinet pour l'axe et de glissière pour les tiges *t*, *t*.

182. Applications photométriques.

La méthode consiste à recevoir la lumière de la source à étudier à travers un système de secteurs d'ouverture variable (fig. 170, à droite). Il est formé de deux disques entaillés, jouant le rôle des roues S_1 et S_2 du paragraphe précédent. *Pendant la rotation même*, on peut faire varier l'angle α découvert, par suite de l'éclat de l'écran éclairé par la source lumineuse à travers le système des disques.

Cet éclat est proportionnel à α, si l'on admet le principe de Talbot.

183. Photomètre de Brodhun.

1° — Le dispositif suivant paraît peu pratique, mais il est ingénieux. *Les secteurs S_1 et S_2 sont fixes.* Le système mobile est constitué par

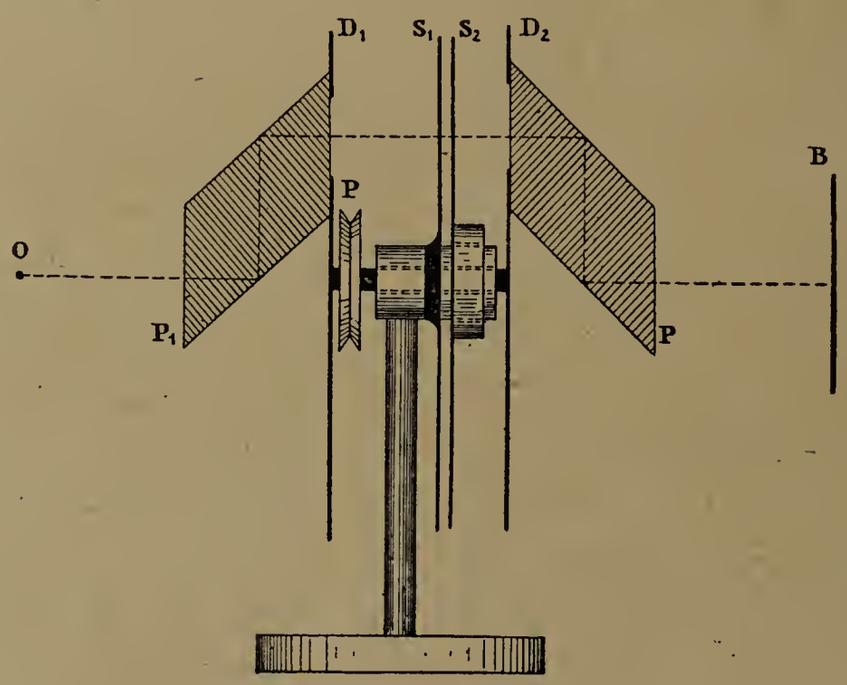


Fig. 172.

les disques mobiles D_1 et D_2 solidaires, percés de deux trous en regard sur lesquels sont collés les prismes (dits de Fresnel) P_1 et P_2.

La lumière vient de la surface diffusante B.

Supposons les secteurs enlevés; pendant la rotation des disques, la surface B est vue du point O comme pendant le repos.

Replaçons les secteurs; la surface B n'est plus vue que pendant une fraction du tour déterminée par l'ouverture des secteurs.

2° — Il semble qu'on arriverait beaucoup plus simplement au même

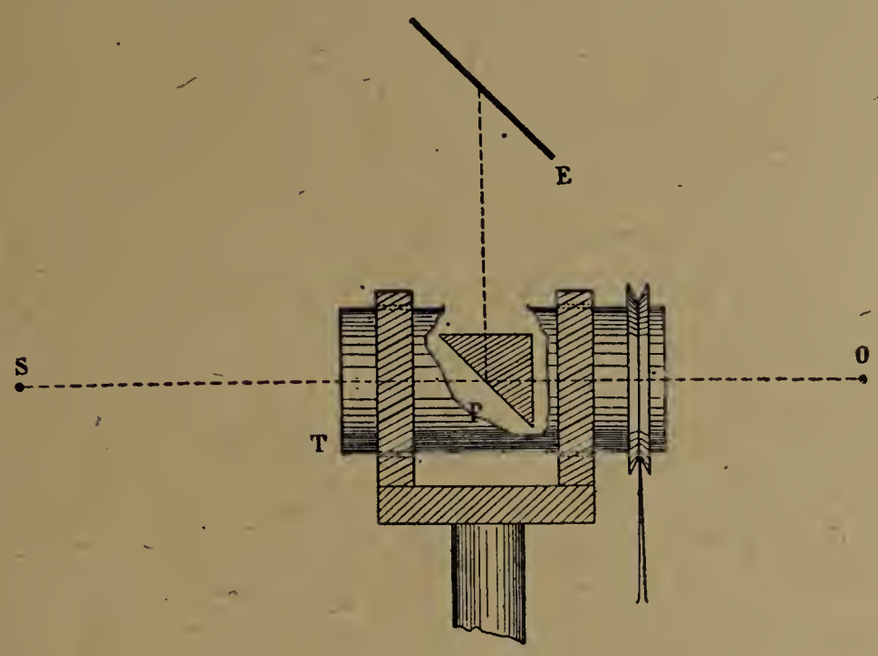


Fig. 173.

résultat au moyen d'un prisme unique P à réflexion totale (fig. 173) fixé dans le tube T et tournant avec lui. L'écran lumineux E est un secteur de cône tronqué admettant SO comme axe et d'angle variable.

Il est éclairé par une source S située sur son axe.

Stroboscopie.

184. Définition de la méthode.

1° — La stroboscopie est une méthode qui modifie en apparence la période d'un phénomène périodique. Elle est basée sur la persistance des impressions lumineuses et sur la définition même du phénomène périodique, d'être identique à lui-même après un nombre quelconque de périodes.

Soit T la période du phénomène. Nous pouvons toujours le considérer comme la variation périodique de la forme d'un certain corps.

Regardons-le à travers un disque mince, percé de trous équidistants sur une circonférence concentrique à l'axe. Le disque tourne avec une vitesse angulaire constante, telle que les trous passent successivement devant l'œil à des intervalles de temps $t + k\mathrm{T}'$; k est un nombre entier quelconque.

Posons : $$\mathrm{T}' = \mathrm{T} + \varepsilon.$$

Nous apercevons le phénomène périodique aux temps :

$$t, \quad t + \mathrm{T} + \varepsilon, \quad t + 2\mathrm{T} + 2\varepsilon, \quad t + 3\mathrm{T} + 3\varepsilon, \ldots,$$

ce qui revient à le voir aux temps :

$$t, \quad t+\varepsilon, \quad t+2\varepsilon, \quad t+3\varepsilon, \ldots.$$

Pendant le temps $T' = T + \varepsilon$, la modification du phénomène pério-

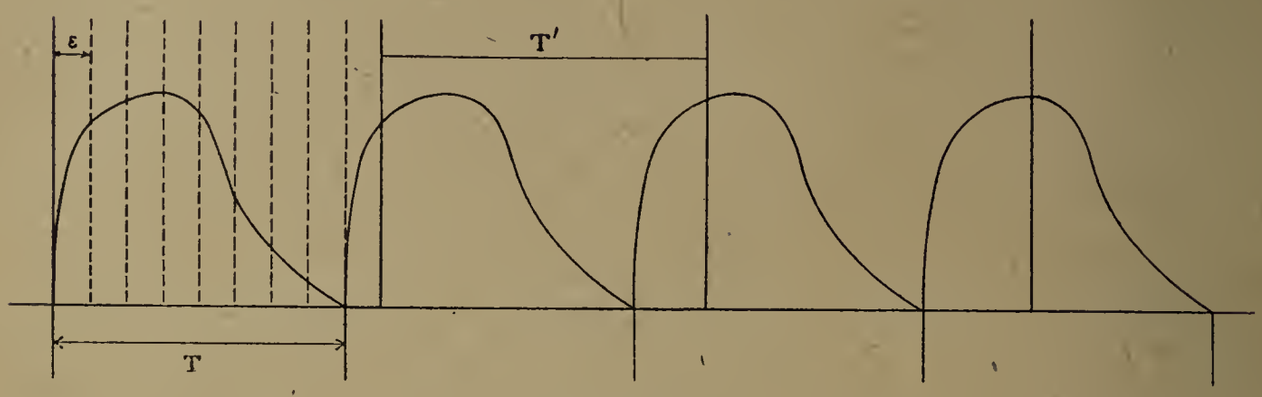


Fig. 173 *bis*.

dique est celle qui correspond au temps ε. Tout se passe donc comme si la période avait crû dans le rapport $(T + \varepsilon) : \varepsilon$.

La période apparente Θ est à la période réelle T dans le rapport :

$$\frac{\Theta}{T} = \frac{T+\varepsilon}{\varepsilon} = 1 + \frac{T}{\varepsilon}, \qquad \Theta = T\left(1 + \frac{T}{\varepsilon}\right).$$

Si ε est petit devant T, le quotient $T : \varepsilon$ est grand : la période apparente est considérable devant la période réelle.

En particulier si $\varepsilon = 0$, le phénomène semble immuable.

2° — Le raisonnement précédent ne suppose rien sur le signe de ε.

Si $\varepsilon > 0$, $T' > T$, on aperçoit successivement des états de phénomène qui correspondent à des temps *croissants*.

Si $\varepsilon < 0$, $T' < T$, on aperçoit successivement des états de phénomène qui correspondent à des temps *décroissants*.

Pour bien comprendre ce qu'il en est, supposons des gouttes qui se succèdent en un point d'une verticale tous les centièmes de seconde et qui tombent avec une vitesse d'un mètre à la seconde (1 cm. en 0,01 seconde). A un instant quelconque, les gouttes sont disposées à un centimètre les unes des autres sur une même verticale.

Appelons les A, B, C,... en remontant.

Éclairons avec des étincelles se succédant tous les 11 millièmes de seconde, ou regardons à travers un disque percé de trous passant devant l'œil tous les 11 millièmes de seconde.

Si au temps 0, nous voyons la goutte A en un certain point P de l'espace, au temps 0,010, nous y verrions la goutte B. Au temps 0,011 nous voyons la goutte B à un millimètre au-dessous de P. Comme rien ne distingue A de B, nous croyons voir la goutte A à un millimètre au-dessous de P. Cette goutte dont la vitesse réelle est 1 cm. en 10 millièmes de seconde, semble donc avoir une vitesse de 1 mm. en 11 millièmes de seconde.

La période du phénomène qui était $T = 0{,}010$, est devenue .

$$\Theta = 0{,}010\left(1 + \frac{0{,}010}{0{,}001}\right) = 0{,}010 \times 11 = 0{,}11.$$

Éclairons avec des étincelles se succédant tous les 9 millièmes de seconde. Au moment du second éclair, nous voyons B à un millimètre *au-dessus* de P. Comme rien ne distingue A de B, nous croyons voir A à un millimètre au-dessus de P. La goutte semble donc avoir une vitesse, *de bas en haut*, de 1 millimètre en 9 millièmes de seconde.

La période du phénomène est devenue :

$$\Theta = 0{,}010\left(1 - \frac{0{,}010}{0{,}001}\right) = -0{,}09.$$

Tandis que pour $\varepsilon > 0$ nous voyons les gouttes tomber avec une vitesse ralentie, pour $\varepsilon < 0$ nous les voyons remonter avec une vitesse d'autant plus grande que ε est plus grand.

3° — La méthode n'a d'intérêt que si ε est très petit.

Même dans ces conditions, le problème est susceptible de généralisation.

a) Supposons :

$$T' = n(T + \varepsilon),$$

où n est un nombre entier. Pratiquement cela revient à boucher régulièrement 1 trou sur 2, 2 sur 3, etc..., du disque à travers nous regardons le phénomène. Reprenons le raisonnement du *1°*; nous retrouvons exactement le même résultat.

La période apparente est liée à la période vraie par la formule :

$$\Theta = T\left(1 + \frac{T}{\varepsilon}\right).$$

Par exemple d'un disque à 24 trous, nous n'en laissons découverts que 12, 8, 6, 4, 3, 2, 1 ($n = 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24$).

Mais à mesure que n grandit, le phénomène devient de moins en moins lumineux et de moins en moins continu en apparence.

Au lieu de boucher régulièrement les trous, il revient au même de donner au disque une vitesse n fois plus petite.

b) Supposons :

$$T' = (T + \varepsilon) : n.$$

où n est un nombre entier. Pratiquement cela revient à percer entre ceux qui existaient, des trous régulièrement espacés.

Le phénomène n'est pas modifié, *à la différence près que nous voyons simultanément n aspects du phénomène régulièrement distribués par rapport au temps dans la période.*

185. Procédés stroboscopiques.

1° — Le dispositif le plus simple consiste dans l'emploi d'un disque de

laiton *assez lourd*, percé de trous équidistants et monté sur l'arbre d'une petite dynamo. S'il a, par exemple, 24 trous et si le moteur fait 15 tours par seconde, la période T′ vaut 1 : 360 de seconde.

On modifie la vitesse en agissant sur le courant, ou en freinant au moyen d'une corde enroulée sur l'axe (ou sur un cylindre coaxial).

Comme manipulation, on détermine aisément la période d'un diapason. Pour une vitesse convenable, il paraît immobile; on mesure alors la vitesse du moteur en enregistrant ses tours par un procédé quelconque.

Réciproquement on peut imposer au disque une vitesse angulaire connue en la maintenant telle que le diapason (étalonné) semble immobile.

Pour effectuer l'expérience du 3° du paragraphe précédent, on prend pour oscillateur un trembleur (sonnerie); à l'extrémité de la partie oscillante, on met un point brillant (tête d'épingle en verre éclairée par une bougie). On regarde à travers le disque dont on fait croître la vitesse. On trouve une série de vitesses pour lesquelles le point brillant semble immobile, mais simple, double, triple, etc...

Au voisinage de ces vitesses, on a le phénomène ordinaire.

On peut faire l'expérience en projection : le corps vibrant est alors fortement éclairé.

2° — Emploi des étincelles.

On démontre d'abord que les étincelles électriques sont de très courte durée. Sur un disque de carton blanc, on dessine une figure quelconque; on le fait tourner rapidement dans une chambre obscure. Quand on éclaire par une étincelle, on aperçoit distinctement la figure : preuve que l'étincelle dure peu, par rapport au temps que le disque met à parcourir un angle rendant méconnaissable la figure.

Expérience analogue : on voit distinctement au microscope les roues mobiles de l'infusoire appelé *rotifère* en éclairant la préparation avec une étincelle.

Ceci posé, on peut stroboscoper en utilisant comme source lumineuse intermittente les étincelles données par une bobine d'induction et un trembleur. Ainsi l'on montre aisément que les veines liquides sont discontinues et l'on étudie leur constitution.

186. **Expériences stroboscopiques.**

On doit à Faraday des expériences curieuses dont l'explication est immédiate.

Montons sur la dynamo un disque sur le pourtour duquel nous découpons des dents régulières (30 par exemple). Regardons son image dans un miroir disposé à un mètre par exemple) en plaçant l'œil près du disque et au niveau des dents. *Nous voyons le disque immobile.*

Perçons dans le disque, entre les dents et le centre, une série régulière de trous dont le nombre soit voisin du nombre des dents (29 ou 31 par exemple). Regardons dans la glace en mettant l'œil au niveau de

ces trous : le disque paraît tourner d'un mouvement ralenti, dans le sens de sa vitesse réelle ou en sens inverse.

Théorie de la persistance.

Les ophtalmologistes se sont ici donné carrière : le nombre de leurs mémoires est infini; malgré cela la théorie de la persistance est peu avancée. C'est qu'il est beaucoup plus facile de faire des expériences, vaille que vaille, que de rassembler les résultats en un faisceau; et l'on sait qu'il ne faut pas se fatiguer les méninges, les mémoires se jugeant au poids du papier.

A partir du moment où l'on admet que les phénomènes sont susceptibles de mesures quantitatives, on admet la possibilité de leur représentation par des algorithmes mathématiques. Il faut évidemment que les lois énoncées ne soient pas logiquement contradictoires.

La théorie qui suit, me paraît la plus simple possible, étant donnés les faits à grouper. Ceux qui la trouveront trop compliquée, voudront bien en indiquer une plus simple; de quelques noms qu'ils se servent, il faudra bien qu'ils introduisent une variable intermédiaire entre l'excitation et la sensation.

Disons tout de suite qu'une telle variable est de même nécessaire entre l'intensité lumineuse et la réaction photochimique (§§ 358 et suivants).

187. Hypothèse fondamentale.

1° — Nous devons nécessairement poser l'hypothèse suivante, ou une hypothèse analogue.

La sensation n'est pas seulement déterminée par l'excitation actuelle; elle dépend aussi des excitations antérieures, de moins en moins à mesure que ces excitations reculent dans le passé.

Au temps τ, compté vers le passé à partir de l'époque actuelle prise pour origine, et pendant le temps $d\tau$, l'intensité était $I(\tau)$.

Admettons un *facteur d'oubli* $\psi(\tau)$.

Nous posons comme hypothèse la plus simple que, dans la sensation actuelle, la part des excitations produites pendant le temps $d\tau$ est :

$$I(\tau) \,.\, \psi(\tau) \,.\, d\tau.$$

La sensation actuelle a pour expression :

$$S = \varphi\left[\int_0^\infty I(\tau) \,.\, \psi(\tau) \,.\, d\tau\right].$$

Exprimons $I(\tau)$ en fonction du temps t.

Le phénomène qui se passe au temps τ dans le passé à partir du temps t actuel, se passe effectivement au temps absolu $t - \tau$.

Nous écrivons donc :

$$S = \varphi\left[\int_0^\infty I(t-\tau) \,.\, \psi(\tau) \,.\, d\tau\right];$$

φ est une fonction à déterminer.

Nous pouvons étendre l'intégrale jusqu'au passé le plus reculé, le facteur d'oubli étant rapidement décroissant et annulant pratiquement tous les éléments de l'intégrale dès que τ (*dans les conditions ordinaires*) est de l'ordre de quelques secondes.

Nous ignorons pour l'instant la forme du facteur d'oubli.

Nous verrons que l'hypothèse précédente si complexe qu'elle soit, est encore très insuffisante pour expliquer les phénomènes.

2° — Ainsi, par hypothèse, la sensation S est une certaine fonction φ, *non pas de l'excitation actuelle*, mais de ce que nous pouvons appeler *l'action primaire*, action déterminée par l'excitation actuelle et les excitations antérieures.

Grâce à cette hypothèse, nous pouvons expliquer les deux phénomènes fondamentaux observés, phénomènes qui paraissent d'abord contradictoires :

a) la sensation n'est pas proportionnelle à l'excitation supposée constante ; Fechner veut même qu'elle soit proportionnelle à son logarithme (§ 116) ;

b) dans le cas d'un phénomène périodique, la sensation est proportionnelle à la moyenne : $\frac{1}{t}\int_0^t I dt$.

Pour expliquer que d'une part les excitations grandes et petites se compensent dans une moyenne, que d'autre part, pour les excitations constantes, il n'y ait pas proportionnalité, même approchée, entre la sensation et l'excitation, force est bien d'introduire une variable intermédiaire ; nous l'appelons *action primaire*.

188. **Excitations constantes.**

1° — Au temps t produisons l'excitation I_0 ; maintenons la constante. La formule donne :

$$S = \varphi\left[I_0 \int_0^t \psi(\tau)\, d\tau\right].$$

Laissons pour l'instant de côté la fonction φ ; ne considérons que la quantité entre crochets qui est l'*action primaire*. Pour préciser la discussion, prenons une exponentielle pour facteur d'oubli. On a :

$$P = I_0 \int_0^t \psi(\tau)\, d\tau = I_0 \int_0^t \exp(-b\tau) \,.\, d\tau = \frac{I_0}{b}\left[1 - \exp(-bt)\right].$$

Ainsi l'excitation étant constante, l'action primaire d'abord nulle, croît asymptotiquement vers une valeur limite *constante* $I_0 : b$.

Rien ne nous empêche d'admettre avec Fechner que la sensation est proportionnelle au logarithme de cette limite.

Nous reviendrons sur le cas où il y a *fatigue*, phénomène qu'on peut expliquer soit par une variation du facteur d'oubli, soit plus vraisemblablement par une variation de la fonction φ.

2° — Excitations momentanées.

Maintenons l'excitation I_0 jusqu'au temps T ; supprimons-la brusquement. Cela revient analytiquement à maintenir indéfiniment l'excitation I_0 et à imposer une excitation $-I_0$ constante au temps T.

L'action primaire P a pour expression :

$$P = I_0 \left[\int_0^t \psi(\tau)\, d\tau - \int_0^{t-T} \psi(\tau) \,.\, d\tau \right].$$

Avec le facteur d'oubli exponentiel, on a :

$$P = \frac{I_0}{b} \left[\exp\left[-b(t-T)\right] - \exp(-bt) \right]. \qquad (1)$$

Dans le cas où l'on maintient l'excitation assez longtemps pour que

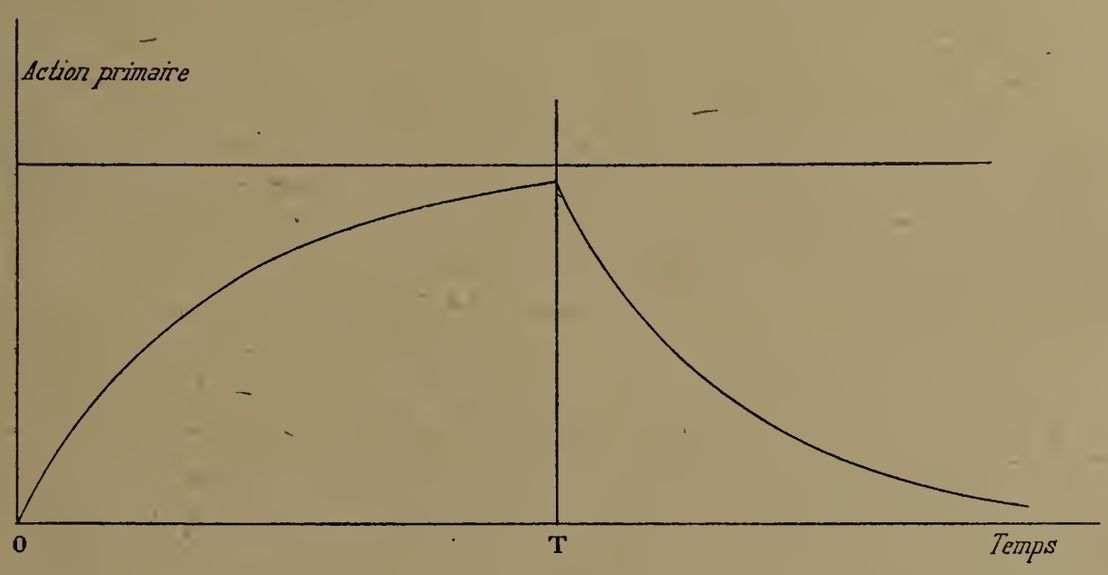


Fig. 174.

l'action primaire soit devenue constante (T grand), après la suppression de l'excitation, la sensation est simplement représentée par :

$$P = \frac{I_0}{b} \exp\left[-b(t-T)\right],$$

ou encore :

$$P = \frac{I_0}{b} \exp(-bt),$$

en prenant pour origine des temps l'instant de la suppression.

3° — Excitations de très courtes durées.

C'est un fait d'expérience qu'il faut un temps sensible pour que nous ayons la sensation d'un corps lumineux : un objet qui passe rapidement devant l'œil, se distingue à peine ou reste invisible.

Nos hypothèses rendent compte de ce résultat.

Pour que la sensation soit perçue, il faut que sa grandeur soit suffisante; il faut donc que l'intégrale :

$$\int_0^\infty I(\tau) \,.\, \psi(\tau) \,.\, d\tau,$$

ait une valeur assez grande; ce qui exige, *quelle que soit la valeur de l'intensité*, que sa durée soit suffisante.

L'effet est sensiblement le même pour une lumière très intense qui agit pendant un temps très court que pour lumière faible qui agit pendant plus longtemps, à la condition que ce plus long temps soit lui-même assez court pour que le facteur d'oubli ait conservé sensiblement la même valeur.

Au § 194, nous reviendrons sur les expériences effectuées à ce sujet; nous verrons alors comment il faut compléter nos hypothèses trop simplistes.

189. **Cas des excitations périodiques rapides.**

1° — En vertu du théorème de Fourier, et puisque nous introduisons l'intensité à la première puissance, bornons-nous à une variation pendulaire.

L'excitation étant toujours positive, posons :

$$I = I_0(1 + \sin \omega t).$$

L'action primaire devient :

$$P = \int_0^\infty \sin \omega(t - \tau) \,.\, \psi(\tau)\, d\tau + \int_0^\infty \psi(\tau)\, d\tau$$

$$= Q + \sin \omega t \int_0^\infty \cos \omega t \,.\, \psi(\tau) \,.\, dt - \cos \omega t \int_0^\infty \sin \omega\tau \,.\, \psi(\tau)\, d\tau.$$

Posons maintenant $\psi(\tau) = \exp(-b\tau)$. On a (*Math. Gén.*, § 304) :

$$\int_0^\infty \cos \omega\tau \,.\, \exp(-b\tau) \,.\, d\tau = \frac{b}{\omega^2 + b^2} = m \cos \beta,$$

$$\int_0^\infty \sin \omega\tau \,.\, \exp(-b\tau) \,.\, d\tau = \frac{\omega}{\omega^2 + b^2} = m \sin \beta.$$

$$\operatorname{tg} \beta = \omega : b, \qquad m = 1 : \sqrt{b^2 + \omega^2}; \qquad Q = \int_0^\infty \exp(-b\tau) \,.\, d\tau = \frac{1}{b}.$$

$$P = \frac{1}{b} + \frac{\sin(\omega t - \beta)}{\sqrt{b^2 + \omega^2}}.$$

Supposons la période $T = 2\pi : \omega$, très petite; c'est supposer ω très grand. Le terme périodique de P s'annule. Il reste :

$$S = \varphi(I_0 Q).$$

Autrement dit, *quelle que soit la fonction φ, la sensation est la même que si l'excitation variable était remplacée par sa valeur moyenne.*

Le résultat vaut pour une loi périodique quelconque, puisqu'on peut la représenter par une somme de termes en sinus et en cosinus.

Il vaut encore pour un facteur d'oubli décroissant assez vite, quelle que soit sa forme.

Notre hypothèse satisfait donc aux deux lois fondamentales rappelées au § 187.

2° — Avec Helmholtz on est tenté de comparer la sensation due à une excitation périodique à la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre sous l'influence d'un courant périodique de période assez courte.

Cette comparaison très mauvaise n'explique en aucune manière le phénomène actuel.

L'équation générale du mouvement de l'aiguille d'un galvanomètre est :

$$M\frac{d^2\theta}{dt^2}+f\frac{d\theta}{dt}+\varphi(I)=C\theta.$$

Écrivons que l'immobilité moyenne est atteinte; il vient en intégrant pour une période :

$$\theta=\frac{1}{CT}\int_0^T\varphi(I)\,dt.$$

Ainsi la déviation ne mesure la quantité moyenne d'électricité transportée par le courant que si la fonction $\varphi(I)$ (*a priori* quelconque) est de la forme kI; en d'autres termes, si le couple dû au courant permanent est proportionnel à l'intensité de ce courant.

Or précisément la caractéristique du phénomène actuel est que la sensation n'est pas proportionnelle à l'excitation supposée constante, et pourtant que cette sensation ne dépend que de l'excitation moyenne quand le phénomène est périodique.

Il est certainement plus correct de comparer les phénomènes que nous étudions, à l'échauffement d'un thermomètre placé dans une boule enduite de noir de fumée et qui reçoit de l'énergie rayonnante. La température ne dépend que de quantité moyenne reçue dans l'unité de temps; elle n'est cependant pas proportionnelle à cette quantité moyenne, la déperdition croissant suivant une exponentielle.

Cette comparaison, plus exacte que celle d'Helmholtz, n'est cependant pas la traduction concrète de notre hypothèse. En effet la déperdition actuelle de chaleur ne dépend que de la température actuelle, tandis que sur la rétine l'action de la lumière dans l'élément de temps $d\tau$ se conserve avec une sorte d'individualité. Helmholtz emploie l'expression *action primaire* mais dans un sens vague et mal défini.

3° — Je n'affirme pas que le facteur d'oubli est une exponentielle; mais l'explicitation de ce facteur sous forme d'exponentielle précise la discussion.

Pour que le phénomène périodique cesse de papilloter, il faut que le terme périodique de l'intensité soit assez petit devant le terme constant; cela revient à dire que ω est grand devant b.

Soit T la période; soit $n = 1 : T$ la fréquence; on a $\omega = 2\pi n$. Le papillotage cesse quand la fréquence n est assez grande par rapport à

$$b : 2\pi.$$

En admettant une exponentielle pour facteur d'oubli, en posant une limite de la valeur relative que doit posséder le terme variable par rapport au terme constant pour que la lumière cesse de papilloter, nous pouvons déterminer une limite du paramètre b, c'est-à-dire acquérir une idée de la loi de décroissance des impressions lumineuses.

190. Expériences de d'Arcy, de Plateau.

1° — Dès 1765 d'Arcy s'est proposé de déterminer quelle doit être la fréquence n pour que le papillotage disparaisse.

Il fait tourner un charbon ardent à l'extrémité d'une tige de 15 à 30 cm. de longueur, au moyen d'un train d'engrenages mû par un poids. La vitesse, réglée par des ailettes dont on modifie l'inclinaison, est mesurée par le temps qu'un rouage lent du train met à faire un tour.

On opère la nuit : l'observateur est dans une chambre obscure; il regarde la machine placée extérieurement, à travers un trou percé dans les volets.

D'Arcy trouve que la courbe décrite par le charbon est parfaitement continue si la durée du tour est inférieure à $0^s,133$, autrement dit, si le charbon fait plus de 7,5 tours par seconde.

Précisons ce que signifie ce résultat.

2° — D'Arcy réfute l'objection que la continuité de l'anneau de feu tient au mouvement de l'œil qui suit inconsciemment le charbon. Il répond que le phénomène reste continu quand à travers une fente on regarde une partie déterminée de l'anneau. Du reste si le mouvement n'est pas assez rapide, le charbon produit non plus l'apparence d'un anneau complet, mais celle d'un arc lumineux, la sensation relative à un point de la circonférence, c'est-à-dire à un point de la rétine, s'évanouissant avant que le charbon ait décrit une circonférence entière.

D'Arcy conclut que la sensation dure un certain temps après que l'objet lumineux a disparu. La seule erreur de ses raisonnements, au surplus très remarquables, est de donner 0,13 seconde comme mesure de ce temps. En effet, il mesure non pas la durée de la sensation, mais le temps pendant lequel elle se maintient *sans déperdition sensible.*

3° — Ces expériences suggèrent une méthode plus correcte, mais, je ne sais pourquoi, rarement employée. D'Arcy trouve une fréquence beaucoup trop faible, parce qu'il utilise un phénomène complexe. Certes la ligne visuelle ne suit pas le charbon; il paraît toutefois impossible qu'elle reste parfaitement immobile. Pour réduire la complication au minimum, il est plus correct, du reste aussi simple, de faire varier l'intensité d'une source *immobile.*

Un disque D percé d'un trou tourne devant un écran E percé d'un

trou correspondant; derrière l'écran est la source S. Elle n'apparaît que lorsque les trous coïncident. L'expérience consiste à déterminer la vitesse nécessaire pour supprimer le papillotage.

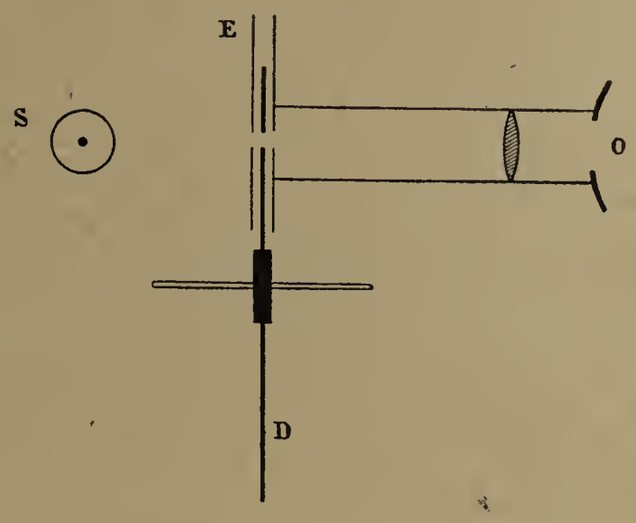


Fig. 175.

Il n'est pas douteux qu'elle est de l'ordre de 50 tours à la seconde et non pas de 7,5. Pour appliquer les courants alternatifs à l'éclairage, on utilise des fréquences de l'ordre de 50, donnant pour l'intensité de l'arc (qui est indépendante du sens du courant) une fréquence double.

Ainsi pour que le facteur d'oubli $\psi(\tau)$ soit *pratiquement constant,* il est probable que τ doit être inférieur à 1 : 50 de seconde.

4° — Reste à savoir ce que signifie *pratiquement constant.*

Autrement dit, dans quelles limites 1 et l, doit varier l'action primaire pour que le phénomène soit papillotant?

Plateau fait tourner un disque partant des secteurs noirs et blancs (fig. 176) : il trouve que si l'on change le rapport des angles noirs et blancs, sans changer le nombre des secteurs (un dans la figure), la vitesse nécessaire pour supprimer le papillotage reste le même.

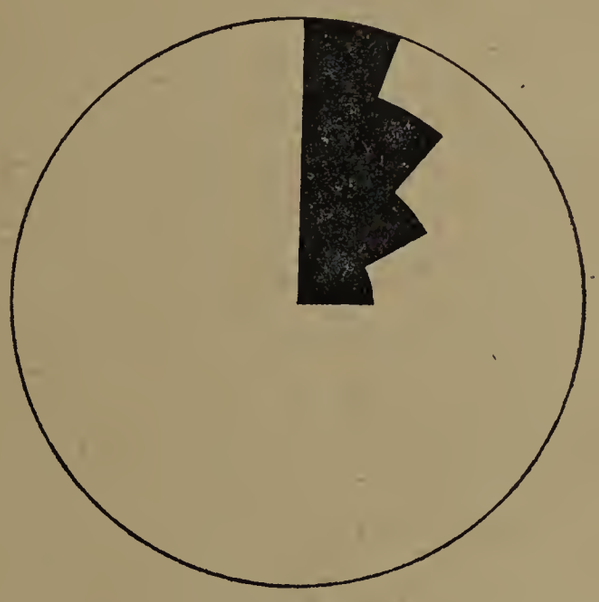


Fig. 176.

En particulier le papillotage disparaît *simultanément* sur toutes les parties du disque représenté.

Nous pouvons exprimer ce résultat en disant que *le papillotage se produit à partir d'une certaine période qui est indépendante de la loi de répartition des intensités dans la période.*

Pour être admis, ce résultat demanderait des expériences exécutées par une méthode plus correcte que celle du disque.

En effet il paraît difficile de concevoir comment une intensité brève et quasiment instantanée ne produit pas plus aisément le papillotage qu'une intensité quasi constante interrompue seulement pendant un temps très court.

Mais si je rappelle que les périodes nécessaires pour supprimer le papillotage du disque étaient, pour Plateau et pour Helmholtz, respec-

tivement de 0,2 seconde et 0,02 seconde, le lecteur admettra volontiers mes réserves sur l'emploi du disque.

Les auteurs semblent d'accord pour trouver que la période supprimant le papillotage diminue quand l'éclairement croît. D'où résulte que notre hypothèse d'un *facteur d'oubli indépendant de la sensation moyenne* est trop simple. Nous trouverons plus loin des résultats confirmant cette conclusion qui est *a priori* très vraisemblable. L'état de la rétine est déterminé par l'ensemble des excitations antérieures; il est naturel de croire que la loi de retour de la rétine à l'état non impressionné dépend de la modification qu'elle a subie.

191. Seuil de la perception. Application à la vision des phares à éclairs.

Supposons très courte la durée de l'éclair, le facteur d'oubli ne chan-

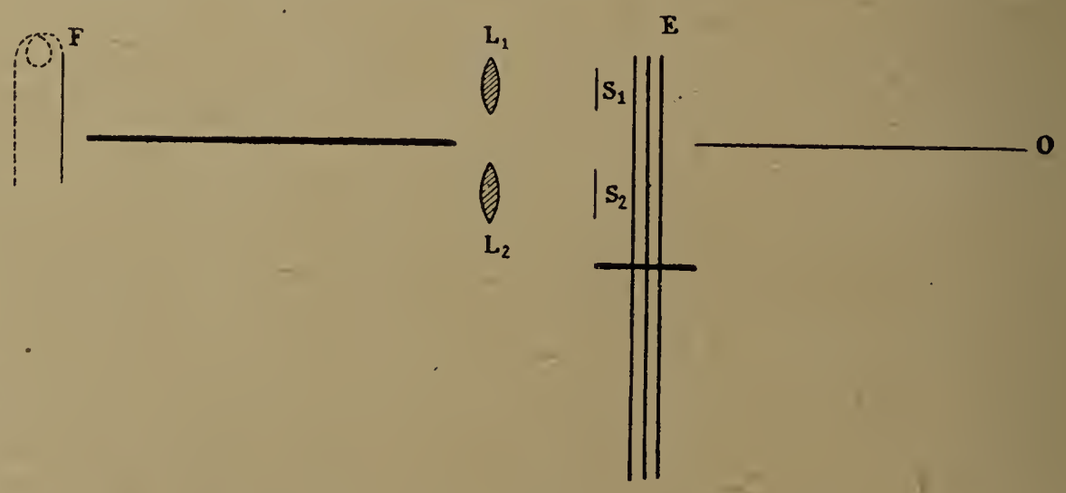


Fig. 177.

geant pas sensiblement pendant qu'il dure, la formule fondamentale donnant l'action primaire maxima :

$$P = \int I\psi(\tau)\,d\tau, \qquad \text{devient :} \qquad P = \psi(\tau)\int I\,dt,$$

où $\psi(\tau)$ a la valeur initiale $\psi(0)$. Autrement dit, l'action primaire maxima est proportionnelle à la quantité totale de lumière émise.

Si I est invariable, on a :

$$P = \psi(0)\,.\,It.$$

D'où résulte que pour atteindre le seuil de la perception, on peut compenser une intensité moindre par une durée plus grande, le produit demeurant constant.

C'est effectivement ce qu'ont trouvé nombre d'expérimentateurs.

Blondel croit la formule insuffisante.

Il propose la formule plus compliquée :

$$P = \psi(0)\,(I - I_0)\,t,$$

où I_0 est une certaine constante.

Dans leurs expériences, Blondel et Rey comparent les éclairs dus à

deux sources, S_1 et S_2, d'assez petites dimensions pour sembler ponctuelles à l'œil O placé à une distance suffisante (6 à 20 mètres). L'une S_1 est d'intensité invariable ; elle existe pendant un temps invariable.

On fait varier l'intensité et la durée de la source S_2 de manière à égaliser les éclairs provenant de S_1 et de S_2.

La source origine est un filament de lampe à incandescence.

Deux lentilles voisines L_1 et L_2 en donnent deux images S_1 et S_2 dont avec des fentes de largeurs variables, on prend des longueurs connues.

Dans une même série d'expériences, la longueur de S_1 est fixe, celle de S_2 est variable.

Les rayons issus de S_1 et de S_2 passent à travers les échancrures d'un *épiscotister* E à trois disques, qui permet de maintenir constante la durée de S_1 et de faire varier celle de S_2. Les éclairs sont égaux par définition si les sources S_1 et S_2 disparaissent simultanément lorsque l'observateur O s'en éloigne peu à peu.

192. **Fatigue. Adaptation.**

1° — D'après le schéma développé ci-dessus, une lumière d'intensité constante doit produire une action primaire d'abord rapidement crois-

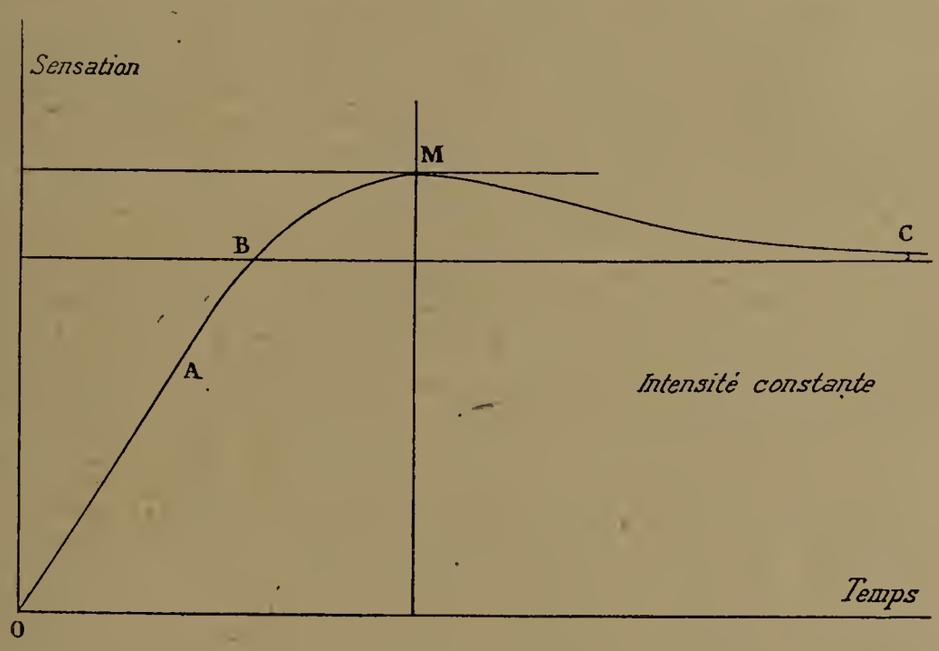


Fig. 177 *bis*.

sante, puis qui tend vers une limite. Si la fonction φ qui relie la sensation à l'action primaire (variable intermédiaire que le principe de Talbot nous a forcé d'introduire) est constamment croissante quand croît sa variable, une lumière d'intensité constante doit elle-même produire une sensation d'abord rapidement croissante, puis qui tend vers une limite. Certains phénomènes montrent que ce système d'hypothèses est insuffisant.

Quand la rétine reste soumise à une lumière d'intensité constante, *sa sensibilité s'émousse*. Comme le phénomène d'éblouissement montre que le facteur d'oubli ψ est loin de décroître plus vite après de fortes excita-

tions, il faut bien admettre que la sensation S est représentée en fonction de l'action primaire P, non pas une fonction $S = \varphi(P)$, déterminée une fois pour toutes, mais par une fonction $S = \varphi(P, t)$, où intervient le temps qu'ont duré les excitations antérieurement à l'époque actuelle. De sorte que les excitations antérieures agissent pour déterminer non seulement la valeur actuelle de l'action primaire, mais encore la relation qui existe entre cette valeur et la grandeur de la sensation.

En particulier pour une intensité constante, la courbe représentant la sensation en fonction du temps a l'allure de la figure 177 *bis*.

Si l'intensité est faible, le maximum M semble disparaître; la sensation semble tendre vers sa limite en croissant d'une manière continue.

Pourtant c'est un fait d'expérience qu'une impression faible peut cesser d'être perçue et qu'elle reparaît si on change la direction du regard.

2° — Adaptation.

La fatigue se présente sous un autre aspect dans l'adaptation de la rétine aux éclairements moyens qu'elle supporte.

Quand du plein jour on passe dans une salle peu éclairée, on commence par n'y rien voir; peu à peu la rétine *change de sensibilité* et les objets apparaissent distinctement. En définitive l'œil est un appareil en quelque sorte multiple, dont la sensibilité est fonction de l'ensemble des sensations antérieures. Lorsque nous faisons agir sur l'œil un éclairement invariable, l'action primaire croît d'une manière continue jusqu'à une limite L; mais elle agit sous un appareil dont la sensibilité décroît à partir d'une certaine valeur initiale jusqu'à une valeur finale qui dépend de la limite L. D'où l'explication du maximum observé.

193. Expériences sur la fatigue. Papillotage.

1° — Les premières expériences sont dues à Brücke. Il faisait tourner à une vitesse variable un disque régulièrement divisé en secteurs blancs et noirs; il trouvait que pour un certain nombre d'alternances par seconde, 17 environ (produisant bien entendu le papillotement, inférieur par conséquent au nombre pour lequel s'applique le principe de Talbot), la sensation lumineuse passe par un maximum.

Afin d'éviter toute mesure, on peut utiliser le disque de la figure.

Pour une certaine vitesse de rotation, la couronne moyenne paraît plus lumineuse que les couronnes intérieure et extérieure.

L'expérience est d'interprétation complexe parce que, suivant les circonstances, la sensibilité de la rétine est différente.

Si le nombre des alternatives est grand, le principe de Talbot s'applique. Supposons les secteurs noirs égaux aux blancs, l'éclairement uniforme du disque est moitié de celui des blancs. Mais la sensibilité de la rétine correspond à cet éclairement diminué : elle est plus grande que pour l'éclairement qui correspond aux blancs.

Si le nombre des alternatives est très petit, l'éclairement est celui

des blancs, mais la sensation correspond à une sensibilité moindre; de sorte que la sensation est très inférieure à celle qui correspondrait au double de l'éclairement de la première expérience, à supposer que la sensibilité reste celle de la première expérience.

Faisons tourner le disque de manière qu'il y ait papillotement. La rétine se repose pendant le passage des noirs : sa sensibilité se rétablit; du moins c'est l'hypothèse que semblent poser les expérimentateurs.

Quand un secteur blanc arrive, la sensation instantanée croît d'abord suivant cette sensibilité augmentée, passe par un maximum, puis décroît, la sensibilité diminuant. On conçoit que pour une certaine vitesse, et à la condition que le maximum de la courbe soit assez relevé (intensités grandes), l'éclairement apparent discontinu de la couronne soit supérieur à ce qu'il est pour des vitesses plus petites ou plus grandes.

Ces expériences posent la question très difficile suivante : *pour une excitation de très courte durée, de quoi dépend la sensation globale, celle dont nous conservons le souvenir*? Correspond-elle au maximum de la courbe 177 *bis*? Correspond-elle à la moyenne des sensations instantanées?

Il semble bien que nous percevons une sensation moyenne. Si le souvenir que nous conservons était lié au maximum de la sensation instantanée, l'expérience précédente serait inexplicable, puisque à la seule condition que l'excitation dépasse une certaine durée, la sensation instantanée passe par le même maximum.

Reste à savoir dans quelles limites la rétine a le temps de revenir à son état initial entre les phénomènes discontinus, et quel est cet état initial. Reste à savoir comment intervient le facteur psychologique d'appréciation des éclats indépendamment du phénomène physiologique réel.

2° — On a réalisé sur la fatigue des expériences d'interprétation moins délicate. Voici d'abord celle de Charpentier.

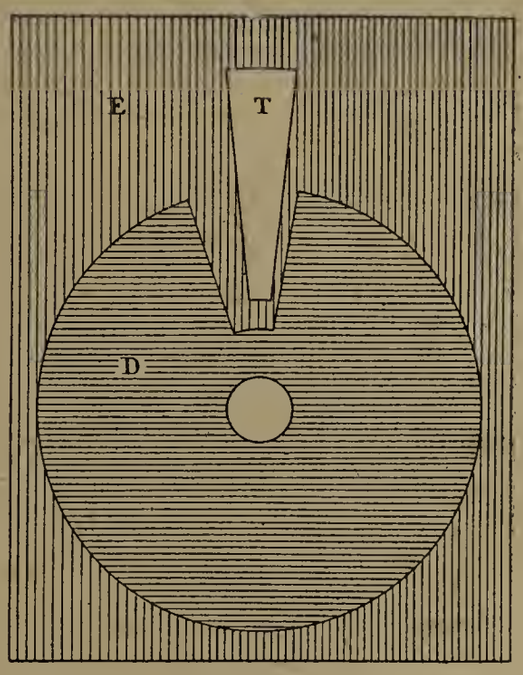


Fig. 178.

Le trou T, percé dans l'écran E, est moitié recouvert par un double disque tournant D dont on peut modifier l'angle α, du secteur vide (*épiscotister*). On éclaire uniformément le trou T; on fait tourner le disque.

En modifiant l'angle α on obtient que la partie inférieure du trou T ait, *à chacune de ses apparitions discontinues*, même éclat que la partie supérieure.

Pour une vitesse donnée du disque, quand on augmente la valeur de

α à partir de zéro, la portion inférieure du trou T est, à chacune de ses apparitions, d'abord plus sombre que la partie supérieure, ensuite de même éclat, enfin plus brillante.

Entre les apparitions de la partie inférieure du trou T, la rétine doit se reposer, reprendre sa sensibilité. Pour cela, on doit fixer un point bien déterminé et invariable. Si on laisse errer la ligne visuelle, la portion de rétine qui regarde les images intermittentes, peut être fatiguée par la vision de la partie supérieure du trou.

Avec cette rétine fatiguée, l'expérience ne réussira pas : la sensation croîtra de zéro à la limite sans passer par un maximum.

194. Expériences de Broca et de Sulzer.

1° — Un carton blanc A est éclairé par un bec B_1 (Auer de 6 carcels) lui-même diaphragmé par une fente à bords horizontaux.

Les objectifs L_1 et L_2 en donnent les images réelles P_1 et P_2.

En E est un *épiscotister* (voir plus haut) faisant un tour à la seconde.

En P est un petit carton blanc éclairé par un bec B_2.

L'expérience consiste à obtenir que l'image aérienne *discontinue* P_2 ait même éclat que le papier P.

On place l'œil en O derrière le système d'une pupille de 2,5 mm. de diamètre et d'un verre correcteur.

Chaque série d'expériences, par suite chaque courbe représentative,

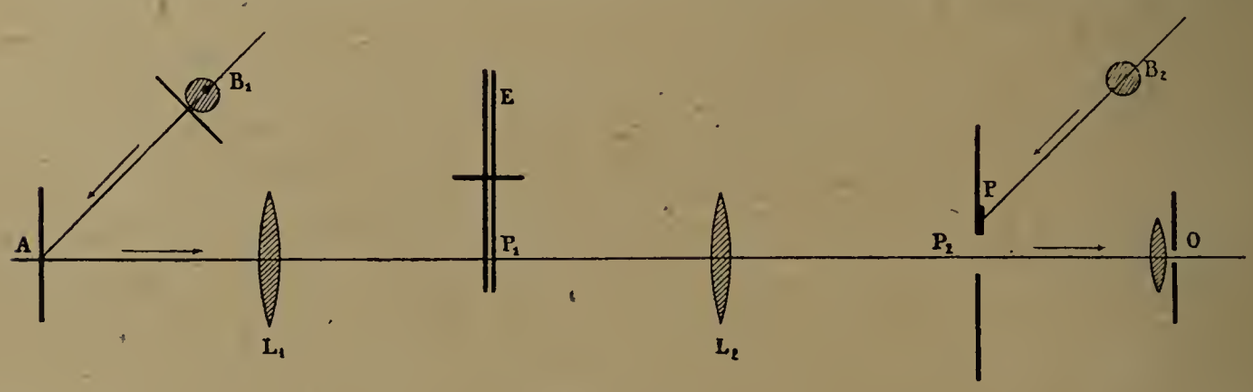


Fig. 178 *bis*.

correspond à un éclairement d'un certain nombre de bougies-mètre imposé au papier A. Chaque point de la courbe correspond à une certaine valeur de l'angle de l'épiscotister déterminant une certaine durée T de l'image aérienne — et à un éclairement corrélatif E du papier P nécessaire pour réaliser la condition susdite.

Voici quelques nombres pour fixer les idées.

L'éclairement en A étant de 126 bougies à un mètre, Broca trouvait pour les éclairements E du papier P et pour les durées corrélatives T (en millièmes de seconde) de l'image aérienne P_2 :

T =	4	8	16	31	62	125	250	∞
E =	42	155	415	610	575	370	200	126

Ainsi quand l'image aérienne dure 31 millièmes de seconde, elle

paraît à Broca près de 5 fois plus brillante que quand elle est permanente.

2° — On doit fixer un point invariable, il faut éviter que la ligne visuelle erre, puisque l'expérience suppose expressément qu'au début de chaque apparition, la portion de rétine qui doit recevoir l'image aérienne, s'est reposée, a repris sa sensibilité (*laquelle, c'est ce qu'il est bien difficile de savoir*). Les auteurs disent qu'il suffit pour cela d'une seconde entre les apparitions. « Il fallait se placer, disent-ils, dans des conditions d'adaptation bien déterminées : c'est ce que nous avons fait en nous plaçant dans la chambre noire. » Pour qui sait combien il est difficile de *fixer*, on peut expliquer la différence des résultats de Broca et de Sulzer (du simple au double) par une légère oscillation involontaire de la ligne visuelle. On n'est pas dans une chambre noire, quand on regarde à quelques centimètres d'un papier dont l'éclairement est de quelques centaines de bougies-mètre.

J'insiste parce que toutes ces expériences butent sur la même difficulté : *définir ce qu'on mesure*. Pour bien faire, il faudrait mettre l'œil longtemps dans le noir ou devant un éclairement bien déterminé, produire une seule fois l'image P_2 pendant un temps T connu, et trouver le moyen d'en mesurer l'éclat E.

On ne recommencerait qu'au bout d'un temps assez long pour que la rétine soit revenue dans un état bien déterminé.

Comme on devait s'y attendre, plus l'éclairement du papier A est grand, plus est grand le rapport du maximum d'éclat de l'image aérienne à son éclat en régime permanent.

Voici quelques nombres pour fixer les idées.

E désigne l'éclairement du papier A en bougies à un mètre, R désigne le rapport ci-dessus défini :

E =	179	126	85	43	21
R =	5,5	4,9	4,6	2,0	1,9

Le régime permanent semble atteint après des temps de l'ordre de quelques secondes.

3° — Inertie rétinienne relative au sens des formes.

Le même appareil sert à déterminer l'inertie rétinienne relative au sens des formes. L'objet à reconnaître est dessiné sur le papier A ; son image se fait en P_2. C'est. par exemple, un certain nombre de traits noirs parallèles et équidistants.

Dans une première série d'expériences, on fait varier l'acuité visuelle exigée de l'observateur : il s'éloigne plus ou moins de P_2.

L'image apparaît sur fond noir pendant le temps T : un réticule faiblement éclairé placé en P_2 permet d'accommoder exactement sur le lieu de l'image.

La figure 179 donne l'allure des résultats pour un éclairement E du papier A égal à 170 bougies à un mètre.

Quand l'éclairement du papier diminue, le temps nécessaire à la distinction des formes augmente, de manière que le produit ET reste à

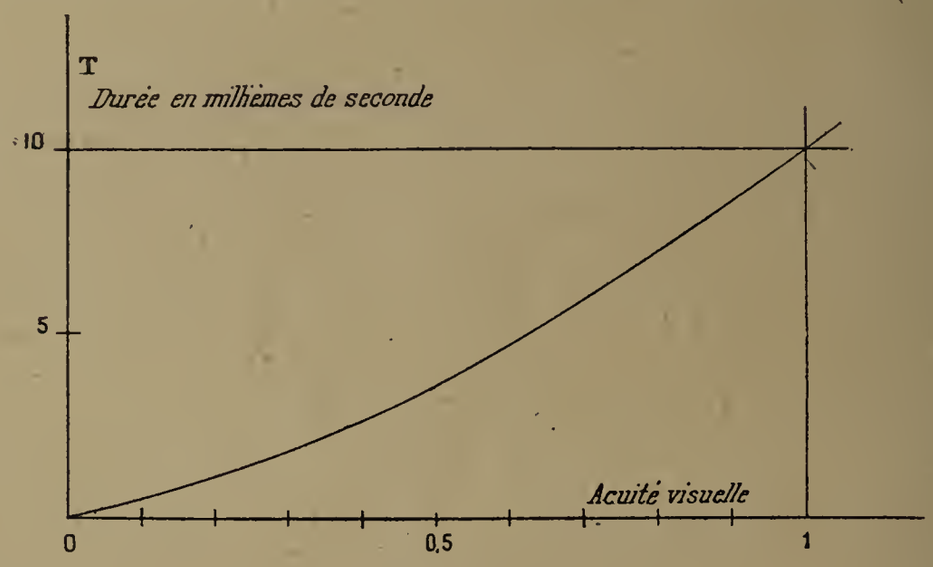


Fig. 179.

peu près constant. Ainsi pour un éclairement de 10 bougies-mètre et l'acuité 1, il faut une durée de l'image égale à 0,16 seconde.

On peut fatiguer l'œil par un éclairage constant : il suffit de peindre l'épiscotister E en blanc et de l'éclairer latéralement.

La durée nécessaire à la distinction des formes augmente.

Toutes ces expériences butent sur la même difficulté : la *production des images accidentelles*. Pour qu'elles aient un sens bien défini, il faudrait que l'apparition de l'image soit unique.

CHAPITRE VI

NOTIONS USUELLES SUR LES MATIÈRES COLORÉES ET LEUR EMPLOI

Avant de parler des *couleurs* considérées *in abstracto*, passons en revue les principales *matières colorées* qu'on trouve dans le commerce. Le nombre de celles qui sont assez fixes pour résister à la lumière est relativement petit. Si le catalogue d'un fabricant indique, par exemple, 150 couleurs à l'huile, y compris les laques de garance et d'aniline, il ne garantit la fixité que du tiers d'entre elles. Encore plusieurs de celles-ci ne sont que des modifications de la même espèce chimique.

Matières colorées usuelles.

195. **Dénomination des couleurs.**

1° — Le *blanc objectif* est la lumière qui nous vient du soleil, lumière supposée non modifiée par le passage à travers notre atmosphère. Nous avons toutes sortes de raisons de croire que sa composition est invariable : *les quantités d'énergie transportées par les diverses radiations sont dans des rapports toujours les mêmes.*

Le *blanc subjectif* est la sensation produite sur l'œil par le *blanc objectif.* Nous verrons qu'il est assez mal défini : du reste il peut résulter d'une infinité de lumières n'ayant pas la composition du blanc objectif.

Le *gris objectif* est du blanc objectif dont on diminue l'intensité ; il a pour limite le *noir* qui est l'absence des radiations visibles.

Le *gris subjectif* est la sensation de blanc dont on diminue l'intensité.

2° — Pour dénommer les matières colorées, on suppose qu'elles sont éclairées par du *blanc objectif,* c'est-à-dire par la lumière solaire, soit directe, soit diffusée par les nuages. L'expérience vulgaire montre en effet que les matières colorées changent de couleur quand on modifie l'éclairage. La lumière qu'elles diffusent, n'a évidemment plus la composition de la lumière blanche objective éclairante ; de plus elle n'est jamais simple.

La sensation de blanc est fournie par une foule de mélanges différents; il ne suffit donc pas, pour dénommer correctement une couleur, de l'éclairer par une lumière *donnant la sensation du blanc* : il faut que l'éclairage soit du *blanc objectif*.

Les substances *blanches* sont celles qui diffusent une lumière donnant la sensation de blanc. Mais c'est un fait d'expérience que les *matières blanches usuelles émettent une lumière qui a la composition même du blanc objectif* : autrement dit, elles diffusent toutes les radiations dans le même rapport. D'où résulte que ces matières ont toujours la même couleur que le faisceau de composition quelconque qui les éclaire.

Les matières *noires* sont celles dont le pouvoir diffusant est *quasi* nul; il est rare qu'il soit rigoureusement nul. Les *noirs* rouges,... bleus, violets, sont des matières extrêmement peu diffusantes, mais diffusant un léger excès de rouge,... de bleu, de violet, quand on les éclaire par du blanc objectif.

On obtient une surface à peu près rigoureusement noire en la recouvrant du noir de fumée, *à la condition de ne pas fixer avec du vernis ou de la gomme* (§ 154); le fixatif rend toujours la surface plus ou moins brillante.

196. **Noirs.**

Les *noirs* sont formés de carbone impur. Ils sont obtenus en calcinant en vase clos ou en brûlant incomplètement des matières végétales ou animales.

Charbon de bois.

On utilise parfois le charbon de bois ordinaire dont on choisit les morceaux. On le broie à sec, puis à l'eau, on le lave et on le sèche.

Comme matière première on utilise souvent des brindilles de hêtre, de vigne, du liège, des noyaux de pêche, de l'écorce de marron, etc., etc. On calcine dans un cylindre tournant analogue à un brûloir à café.

On réalise ainsi des noirs plus ou moins roux, à grains plus ou moins gros, plus ou moins réfléchissants....

Noir d'os ou d'ivoire.

On l'obtient par la calcination des os en vase clos (il va de soi que tous les noirs d'os pour la peinture sont censément faits avec des rognures d'ivoire). C'est un carbone mélangé d'une grande quantité de phosphate et de carbonate de calcium. Il fixe très bien les matières colorantes; d'où son emploi industriel pour clarifier.

Noir de fumée ou de bougie.

C'est le noir d'une lampe qui *file*. Dans la fabrication industrielle, on brûle une résine ou un goudron de houille en ayant soin de réduire l'arrivée de l'air. L'encre de Chine est un noir de fumée obtenu avec de l'huile ou du bois résineux.

Le goudron est placé dans une marmite en fonte chauffée par un foyer. Les produits fuligineux de la combustion incomplète se rendent

dans une chambre cylindrique, fermée par un toit conique doublé d'un cône mobile en tôle qui sert à ramoner les parois de la chambre.

197. Blancs.

Les blancs *couvrent* ou *ne couvrent pas*. On dit qu'ils *couvrent* lorsqu'ils restent opaques quand ils sont en suspension *dans l'huile*; broyés dans l'huile et étendus, ils *cachent* les dessous.

Blanc d'argent ou de plomb.

On désigne sous ces noms la *céruse*. C'est un composé en proportions variables (formule $CO^3Pb + nPbO + mH^2O$) de carbonate, d'oxyde et d'eau. Pour l'obtenir on passe par l'intermédiaire d'un acétate. Par exemple, on met des lames de plomb dans des pots en terre dont le fond contient du vinaigre de mauvaise qualité et qu'on dispose sur du fumier. D'où attaque du plomb et formation d'acétate qui se transforme en hydrocarbonate sous l'action du gaz carbonique provenant de la fermentation du fumier. Plus proprement on fait agir l'acide acétique sur l'oxyde de plomb et on soumet à un courant de gaz carbonique.

Le blanc de plomb noircit sous l'action des vapeurs sulfhydriques; en effet le sulfure de plomb est noir.

Blanc de zinc.

On chauffe du zinc dans un creuset. Dès que le métal arrive à l'ébullition, la vapeur s'enflamme. Il se produit des flocons blancs d'oxyde de zinc.

Le blanc de zinc ne noircit pas; en effet le sulfure de zinc est blanc.

Blanc fixe.

C'est le *sulfate de baryte*. On l'obtient au moyen du sulfate de baryte naturel ou spath pesant. On le transforme en chlorure qu'on précipite par l'acide sulfurique.

Blanc de Meudon, de Troyes....

C'est de la craie. La craie *à tableau* a été longtemps du calcaire naturel débité à la scie. Le blanc fixe et les blancs crayeux ne couvrent pas; on ne les emploie que dans la peinture à l'eau.

198. Rouges.

Cinabre et vermillon.

Le sulfure de mercure naturel ou *cinabre* HgS est d'un beau rouge : on l'emploie comme couleur après broyage. Quand on chauffe du soufre et du mercure, ou quand on fait agir H^2S sur un sel mercurique, on obtient une poudre *noire* qui par sublimation donne des cristaux rouges. On remarquera, ce qui est très important, que la composition chimique n'est pas liée à la couleur.

Le sulfure noir obtenu par précipitation se transforme en sulfure rouge (*vermillon*) quand on le fait digérer avec les sulfures alcalins. On triture le mélange de soufre et de mercure et on le met plusieurs heures en présence d'une solution de potasse.

Le nombre des recettes est du reste infini.

MINE ORANGE.

On connaît plusieurs oxydes de plomb.

Le *massicot* et la *litharge* ont pour formule commune PbO. Chauffé à l'air à basse température, le plomb donne le *massicot*, poudre amorphe jaune rougeâtre. Chauffé, le massicot fond et donne par refroidissement la *litharge* sous forme de paillettes rougeâtres.

Le massicot séché et grillé absorbe de l'oxygène et donne le *minium* Pb^3O^4.

Le minium de belle couleur (*rouge de Saturne*, *mine orange*) s'obtient par le grillage de la céruse.

199. **Mars, ocres et terres.**

COLCOTHAR OU ROUGE D'ANGLETERRE.

C'est le sesquioxyde de fer Fe^2O^3 obtenu par calcination du sulfate ferreux. Il se trouve comme résidu de la fabrication de l'acide pyrosulfurique :

$$2SO^4Fe = Fe^2O^3 + SO^2 + SO^3.$$

L'acide anhydre SO^3 est reçu dans de l'acide ordinaire SO^4H^2 et donne l'acide pyrosulfurique $S^2O^7H^2$. On retire le sesquioxyde des cornues, on le pulvérise et on le broie sous l'eau.

JAUNE, ROUGE, BRUN, VIOLET DE MARS.

On prépare le jaune de Mars en précipitant par le carbonate de potassium une solution étendue et en proportions variables de sulfate ferreux et de sulfate d'alumine. Il se dépose un oxyde verdâtre qui jaunit à l'air. La teinte varie suivant les conditions de la précipitation, par conséquent suivant la teneur en sulfate d'alumine et suivant les concentrations des solutions mélangées.

Le jaune de mars (qui est du sesquioxyde pur) soumis à une température croissante fournit le rouge, le brun, le violet de mars. C'est une affaire de routine. Cet exemple montre à quel point la couleur est peu liée à la composition chimique puisque le sesquioxyde de fer fournit à lui seul toute une gamme.

Parmi les couleurs de cette catégorie, je citerai *le rouge Van Dyck*, *de Venise*, *le rouge indien*, *anglais*, *le violet Van Dyck*....

OCRES.

Les *ocres* sont des argiles (silicates hydratés d'alumine) colorées par du sesquioxyde de fer. On les trouve en carrières dans la Nièvre, le Cher, l'Yonne. On sépare les poudres diversement fines par lévigation. Par calcination on passe de l'ocre jaune à la série des ocres rouges et brunes.

TERRES.

Les terres de Sienne, d'Italie, d'Ombrie, etc., sont également colorées par du sesquioxyde de fer. Elles diffèrent des ocres par la nature de la matière colorée qui n'est plus nécessairement de l'argile. On modifie leur couleur par calcination ; d'où la distinction en *terres naturelles* et

terres brûlées. Leurs teintes sont *brunes* plus ou moins tirant sur le rouge.

Les couleurs dérivées du sesquioxyde de fer sont très solides et n'ont aucune réaction sur les autres couleurs. Quand les maçons pilent de la brique et la délaient dans l'eau pour obtenir sur les murs des tons allant du jaune au rouge, ils peignent *en fresque* avec des *ocres*.

200. **Jaunes.**

Jaune de cadmium.

C'est le sulfure de cadmium CdS. On l'obtient en précipitant un sel soluble de cadmium par l'acide sulfhydrique ou par un sulfure alcalin. La teinte dépend des conditions de la précipitation.

Jaune de chrome.

C'est le chromate de plomb $PbCrO^4$. On l'obtient par précipitation du nitrate ou de l'acétate de plomb par une solution de chromate de potassium K^2CrO^4. Suivant les conditions de la précipitation (concentration des solutions, température, addition de chaux,...), la teinte varie du jaune clair au jaune orangé.

Jaune citron ou de zinc.

C'est le chromate de zinc. On traite l'oxyde de zinc par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique; ce qui revient à traiter l'oxyde de zinc par l'acide chromique. Il a pour formule $ZnCrO^4 + 7H^2O$; il est isomorphe avec le sulfate de zinc.

Jaune de Naples.

C'est un antimoniate de plomb (sel d'un acide dérivé de l'oxyde Sb^2O^5) de composition mal définie. On l'obtient en fondant l'émétique (tartrate d'antimonyle et de potassium $C^4H^4O^6$ (SbO)K avec du nitrate de plomb et du sel marin. Réussi, le jaune de Naples est d'un beau ton d'or.

Il noircit et verdit rapidement.

Jaune indien.

C'est le dépôt de l'urine des vaches indiennes auxquelles on fait manger des feuilles de manguier; c'est le sel de calcium et de magnésium de l'acide euxanthique. Sa teinte varie du jaune orangé au jaune verdâtre; elle est généralement bouton d'or foncé. On considère le jaune indien comme une couleur solide.

Orpiment.

C'est le sulfure d'arsenic As^2S^3.

Il se présente en petits cristaux jaune d'or, translucides.

201. **Verts.**

Verts d'oxyde de chrome.

On obtient le *vert gris* en réduisant le bichromate de potassium par la fécule ou le soufre.

$$Cr^2O^7K^2 + S = SO^4K^2 + Cr^2O^3.$$

On obtient le *vert jaune* en décomposant par la chaleur le chromate de mercure obtenu en précipitant le chromate de potassium par l'azotate mercurique. Le mercure distille, l'oxygène se dégage : il reste l'oxyde de chrome.

Le *vert émeraude* est un oxyde de chrome hydraté $Cr^2O^4H^2$. On chauffe au rouge sombre de l'acide borique et du bichromate de potassium : il se forme un borate double de potassium et de chrome qu'on reprend par l'eau bouillante.

Malachite ou azurite

C'est le carbonate de cuivre naturel ($2CO^3Cu + CuH^2O^2$).

On prépare cette couleur artificiellement en précipitant à 60° le sulfate de cuivre par le carbonate de sodium (2 de sulfate, 4 de carbonate).

Vert de gris, de Scheele, Véronèse, de Schweinfurt, cendres vertes.

Nous rencontrons ici toute la gamme des *verts de cuivre*. Ce sont des acétates, arsénites, arséniates de cuivre. Ils sont tous vénéneux et noircissent sous l'influence des vapeurs sulfhydriques (le sulfure de cuivre est noir).

Le *vert de gris* est un acétate de cuivre qui se forme en exposant le cuivre à l'action du vinaigre.

Le *vert de Scheele* est un arsénite de cuivre dérivé de l'oxyde As^2O^3. Il se forme quand on précipite le sulfate de cuivre par l'arsénite de potassium : on obtient le corps $Cu^3(AsO^3)^2$ ou peut-être $CuH\,AsO^3$

Le *vert Véronèse* est un arséniate de cuivre.

202. **Bleus.**

Lapis lazuli, outremer.

Le *lapis lazuli* (*outremer naturel*) et l'*outremer artificiel* sont un composé de silice SiO^2, d'alumine Al^2O^3, de soude et de sulfure de sodium; les éléments constituants sont donc Si, Al, Na, O, S, sans qu'on sache trop comment ils sont associés.

Pour pulvériser le corps naturel, on commence par le chauffer au rouge et par l'*étonner* en le plongeant dans un liquide (vinaigre ou alcool).

Voici un des moyens d'obtenir l'outremer artificiel. On mélange une argile non ferrugineuse (silicate d'alumine) et du sulfure de sodium finement pulvérisés. On grille au rouge. La matière se colore successivement en brun, rouge, vert et bleu. On arrête l'opération suivant les nuances qu'on veut obtenir et qui vont du vert au violet.

L'outremer est une admirable couleur très solide.

Bleu de Prusse (de Paris, de France, de Chine, minéral).

Le *bleu de Prusse* est le ferrocyanure ferrique (§ 303) :

$$(Cy^6Fe)^3Fe^4.$$

On l'obtient en traitant le prussiate jaune (ferrocyanure de potassium)

par un sel ferrique. On utilise parfois un sel ferreux; on laisse ensuite le précipité s'oxyder à l'air.

Le bleu de Prusse n'est pas solide comme le prouve l'observation suivante. Des volets peints en gros vert (*vert Milori*) obtenu par mélange de bleu de Prusse et de jaune de chrome, jaunissent après quelques années de soleil; le bleu a disparu. Contrairement à l'opinion générale, le bleu de Prusse n'est pas un poison.

Bleus de cobalt.

Le *bleu Thénard* est un aluminate de cobalt. On l'obtient en traitant l'oxyde de cobalt par l'alumine résultant de la décomposition par la chaleur de l'alun ammoniacal. C'est une couleur très solide et très employée dans la peinture à l'huile.

L'*azur* ou *smalt* est un silicate double de potassium et de cobalt; c'est donc un verre. Pour l'obtenir on part du *speiss* qui est un arséniure de cobalt et de fer. On le grille pour chasser l'arsenic; on le fond avec du sable et du carbonate de potassium. Les *azurs* de teinte claire servent pour *azurer* les tissus, le papier; on sait en effet que le papier blanc parait jaune; pour qu'il paraisse blanc, il faut le bleuter.

C'est pour la même raison qu'on azure le linge avant de le repasser.

Bleu de cuivre, de Pompeï.

C'est un silicate de cuivre et de calcium; plus exactement c'est un verre coloré par de l'oxyde de cuivre. Son nom lui vient de ce qu'il était connu des anciens.

203. Violets.

Les violets picturaux s'obtiennent généralement par mélange.

Il existe cependant des matières colorées en violet.

Le *violet de cobalt* est un phosphate de cobalt.

Les *violets minéraux* sont des phosphates de manganèse.

Enfin nous avons rencontré un violet parmi les Mars.

204. Carmins et laques.

On appelle généralement *carmin* (de garance, de cochenille, de safran, d'indigo, d'oseille,....) une matière colorante extraite d'un végétal ou d'un animal. On appelle *laque* la combinaison du carmin avec un oxyde métallique (Al^2O^3, ZnO, Sn^2O,...)

Kermès, cochenille.

Ce sont des insectes qui vivent : les premiers sur un chêne vert, en France méridionale, en Algérie... (ils servent aussi à fabriquer un sirop et une liqueur); les seconds au Mexique. On les appelle quelquefois *graines d'écarlate* parce que desséchés, ils ressemblent à une graine.

On en extrait une matière tinctoriale *rouge* qui donne des laques roses et rouges avec l'oxyde d'étain. Elles ne sont pas solides.

Garance.

La garance s'extrait de certaines plantes de la famille des *rubiacées*.

Les chimistes ont réussi la synthèse des matières colorantes de la garance l'*alizarine* en particulier. Cette matière donne avec l'alumine des laques allant *du rose au brun,* très solides à la lumière. On modifie les nuances en ajoutant à l'alumine de la chaux et diverses autres substances.

Les laques de garance sont plus solides que celles de cochenille.

LAQUES JAUNES.

On tire des teintures jaunes d'une infinité de plantes (graines de Perse, d'Avignon, safran, bois de curcuma,....); on en fait des laques plus ou moins solides. Citons en particulier les laques de *gaude* (sorte de réséda sauvage) qui sont utilisées de toute antiquité.

INDIGO.

La matière colorante est l'*indigotine*. La culture de la plante indienne, dont on se servait antérieurement (indigofera), a complètement disparu depuis qu'on sait faire la synthèse de l'indigotine.

Je laisse de côté les laques d'aniline dont les couleurs sont fort belles mais trop peu solides pour que leur emploi soit recommandable.

ORSEILLE.

On l'extrait de certains lichens des îles de la Méditerranée, Canaries, du Cap-Vert.... L'orseille donne des teintes qui varient du rouge grenat au violet, c'est-à-dire qui comprennent toute la série des pourpres.

La matière colorante est à la surface des lichens sous forme d'une poussière grise qu'on détache mécaniquement et qu'on traite par l'ammoniaque.

205. **Couleurs diverses.**

Le *bitume* et la *momie* sont des matières *brunes*, transparentes servant aux *glacis*; elles sont employées en couches très minces laissant transparaître la couleur sous-jacente dont elles modifient le ton. Malheureusement elles noircissent et se craquellent.

La *sépia* se trouve dans la liqueur *brune* que répand la sèche pour faire l'obscurité autour d'elle.

Le *bistre* est une couleur *brune* qu'on retire de la suie.

La *gomme gutte* est une gomme résine jaune foncé fournie par des végétaux du Cambodge et de Ceylan. Sa poudre est *jaune*; elle forme avec l'eau une émulsion *jaune citron*.

Elle se dissout dans les alcalis en donnant une couleur rouge intense.

Elle est très usitée en peinture à l'*aquarelle*.

206. **Diverses espèces de peinture.**

Les divers procédés de peinture se classent d'après la matière fluide dans laquelle les poudres colorées sont mises en suspension pour l'étendage. Dans tous les cas les poudres sont insolubles dans leur véhicule liquide; celui-ci doit ou s'évaporer ou sécher, mais de manière à abandonner une matière agglutinée assez résistante au frottement.

1° — Peintures a l'aquarelle, lavis.

Les couleurs sont employées *en pains*, c'est-à-dire broyées avec de l'eau gommée et sucrée, moulées et séchées.

Pour l'emploi on les délaye dans de l'eau gommée.

Le lavis à l'encre de Chine est une peinture à l'aquarelle.

On peut encore employer des couleurs dites *moites*. Elles sont broyées avec de l'eau gommée additionnée de glycérine et enfermées dans des tubes de plomb.

Les blancs de l'aquarelle sont obtenus en réservant le blanc du papier.

Le charme des couleurs d'aquarelle est leur transparence. Le papier n'est jamais couvert; aussi son grain a-t-il une certaine importance.

2° — Peintures a la détrempe (colle de peau).

Le véhicule est une solution de colle forte (colle de peau, gélatine); on la fait gonfler dans l'eau froide et on la dissout dans l'eau chaude. La détrempe s'emploie pour peindre les plafonds, les boiseries, les décors de théâtre; on l'utilisait pour les tableaux avant l'invention de la peinture à l'huile. Les couleurs y ont un ton mat très décoratif.

La première couche doit être donnée à chaud avec une solution de gélatine concentrée (colle presque pure); les autres sont de moins en moins chaudes et de plus en plus pauvres en colle.

Les *papiers peints* sont imprimés avec des couleurs délayées à la colle.

La *gouache* n'est en définitive qu'une espèce de peinture à la détrempe. Elle diffère de l'aquarelle par l'opacité des couleurs.

Les blancs n'y sont plus obtenus par réserve.

3° — Peintures a la cire.

Les artistes grecs et romains ont pratiqué la peinture *à la cire*. Les couleurs étaient délayées dans la cire fondue; on les appliquait sur la muraille parfaitement séchée et chauffée par des réchauds de charbon.

On peut encore se servir de cire dissoute dans l'essence de térébenthine.

4° — Peintures a l'huile.

Le véhicule est une huile *siccative* (§ 373), huile de lin, d'œillette, de noix.... L'huile est rendue plus siccative par *cuisson* avec de la litharge ou du bioxyde de manganèse; elle est mélangée d'essence de térébenthine. Les couleurs sont broyées avec l'huile et enfermées dans des tubes de plomb.

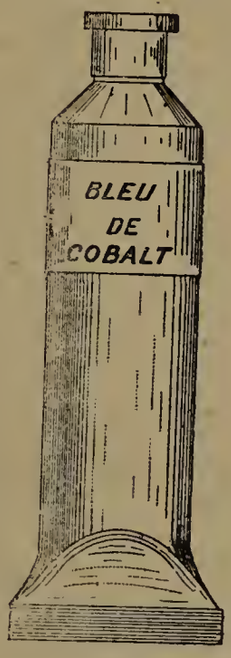


Fig. 180.

Pour la peinture en bâtiment on emploie l'huile de lin. Au moment d'utiliser les couleurs, on les délaie avec de l'essence de térébenthine et on ajoute un *siccatif* solide ou liquide, dont une petite quantité suffit pour rendre l'huile siccative.

La première couche est donnée avec de l'huile *sans couleur* afin qu'elle pénètre mieux. Pour les peintures soignées (carrosserie) chaque couche

est *poncée* (polie à la pierre ponce). On donne au moins deux, souvent trois ou quatre couches.

La peinture à l'huile est toujours rendue brillante par le séchage de l'huile qui fait vernis. On peut du reste la *vernir* après coup en passant une couche d'une solution de résine (colophane, copal) dans un mélange d'huile de lin et d'essence. Dans la peinture en bâtiment on mélange la résine et l'essence à la dernière couche.

Nous verrons que le véhicule intervient par son indice (§ 216). La peinture à l'huile (indice voisin de 1,48) est caractérisée par la richesse de ses teintes. Elles sont moins lumineuses, mais elles sont plus pures que les teintes de l'aquarelle. Les réflexions de la lumière incidente s'y produisent à une plus grande profondeur.

207. Crayons et pastels.

1° — Crayons a la mine de plomb, crayons Conté.

Les crayons ordinaires sont de petites baguettes de plombagine (mine de plomb) enfermées dans des cylindres de bois. On les obtenait autrefois en débitant à la scie des masses de graphite naturel préalablement chauffées en vase clos.

A la fin du XVIIIe siècle Conté transforma l'industrie des crayons en mélangeant le graphite finement pulvérisé avec de l'argile (silicate d'alumine, kaolin, terre de pipe) exempte de chaux et de sable. On fait une pâte bien homogène avec un peu d'eau, on la coule dans des moules appropriés, on sèche ; on démoule et l'on chauffe au rouge. Suivant la température et les proportions du mélange, on obtient tous les degrés de mollesse et de dureté.

Les crayons noirs *dits Conté* sont un mélange de noir de fumée et d'argile. La pâte obtenue avec un peu d'eau est moulée et cuite en vase clos.

2° — Pastels.

Ils sont fabriqués avec un mélange de kaolin finement pulvérisé et de matières colorantes. On fait une pâte avec un liquide agglutinant (eau gommée, solution de gomme laque dans l'alcool,....) On moule sous forte pression, on coupe à longueur convenable et l'on fait sécher à une douce chaleur.

Nous verrons que les poudres non agglutinées émettent une lumière toujours lavée de blanc. Le pastel (non fixé) est dans ce cas. On attribue sa légèreté et son charme à la saturation faible des couleurs.

Ces qualités disparaissent en grande partie par l'emploi du fixatif.

3° — Fusain.

Le *fusain* est simplement du charbon de bois fait avec des menues branches de fusain, de saule ou de tremble.

4° — Fixatifs. Pulvérisateurs.

On appelle *fixatifs* des solutions de gomme dans l'eau ou de résine dans l'alcool dont on recouvre les fusains ou les pastels pour empêcher

la poudre de s'effriter. Les pastels perdent à l'opération leur matité, conséquemment une bonne part de leur effet artistique. Malheureusement, non fixés, ils sont à ce point fragiles que la trépidation du sol des grandes villes rend leur vie très éphémère. A Paris le métro et certains tramways ont voué les pastels à une mort prochaine.

Le fixatif est employé sous forme de nuage qu'on obtient avec un *pulvérisateur*. Cet appareil (fig. 181) est constitué par deux tubes T et T', effilés à l'une de leurs extrémités et qu'une charnière permet de

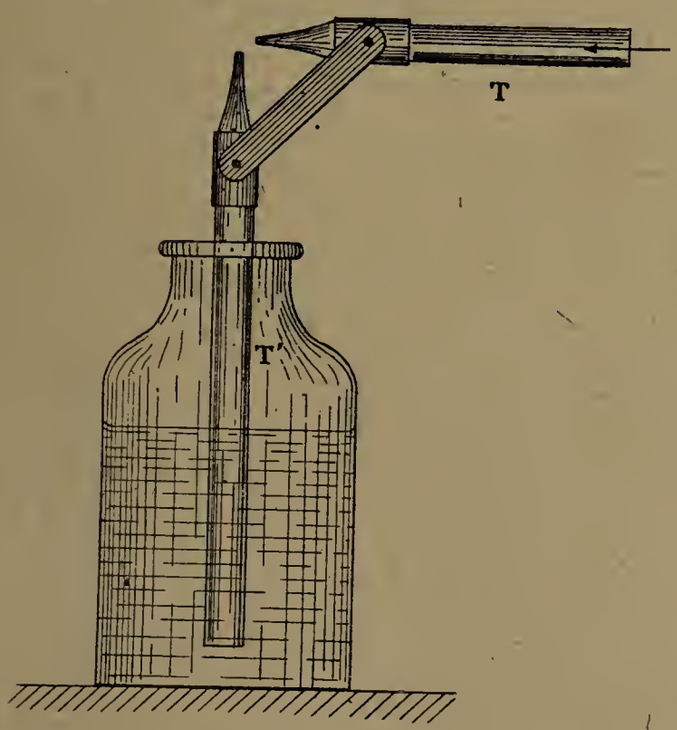


Fig. 181.

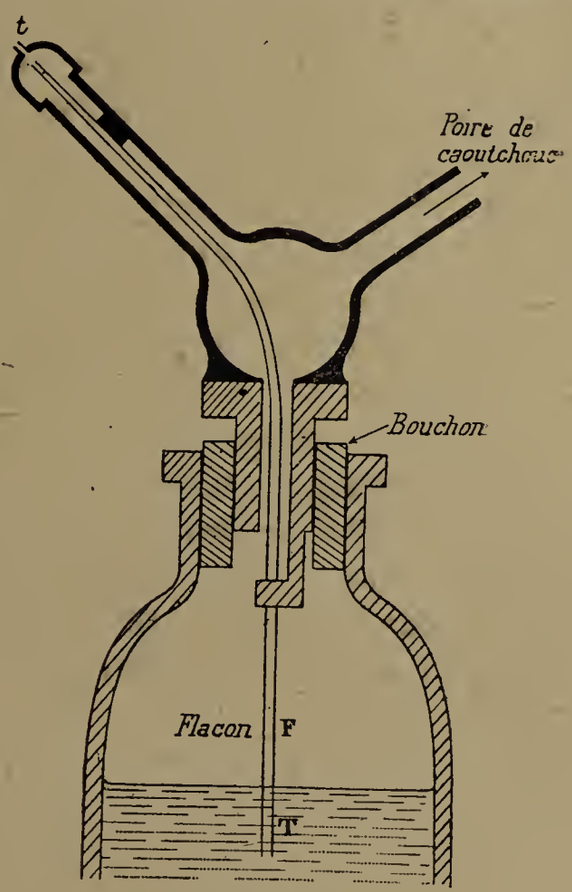


Fig. 182.

placer dans des directions rectangulaires. En soufflant vigoureusement dans l'un, on produit dans l'autre l'aspiration du liquide et sa pulvérisation par mélange avec le courant d'air.

Le pulvérisateur peut avoir une autre forme (fig. 182). En comprimant une poire de caoutchouc, non représentée, on produit simultanément un excès de pression dans le flacon F qui contient le liquide, et un courant d'air vers l'extérieur à travers le très petit trou *t*. Le liquide monte dans le tube T en raison de la différence des pressions qui s'exercent sur le liquide et à l'extrémité supérieure du tube T *voisin du trou t*. La gouttelette liquide est prise par le courant d'air à l'extrémité du tube *t* et sort en nuage.

Les pulvérisateurs de coiffeur sont construits sur ce modèle.

208. Substratum divers de la peinture.

1° — Peintures a fresque.

Le substratum est une muraille recouverte d'un mortier de ciment

(chaux, sable et pouzzolane). Les couleurs sont délayées à l'eau et pénètrent dans l'enduit tandis qu'il est encore *frais* (d'où le nom du procédé). Le nombre des couleurs utilisables est très réduit à cause de la chaux (ocres, jaune de cadmiun, bleu d'outremer et de cobalt, vert de chrome). Le genre est complètement délaissé.

Les peintures murales sont maintenant exécutées sur toile ; on les colle ensuite à l'aide d'un mélange de céruse et d'huile de lin (*marouflage*).

2° — Papier.

C'est le substratum ordinaire pour l'aquarelle, le lavis, la gouache. Suivant le but poursuivi, il est plus ou moins lisse (voir l'Appendice I).

3° — Bois.

On peint à l'huile sur bois ; l'inconvénient est de limiter les dimensions du tableau. Pour empêcher le jeu du bois, il est en effet désirable que le panneau soit d'un seul morceau. Les assemblages doivent être renforcés par derrière. On utilise des panneaux de bois mince pour les études.

On prépare la surface avec de la colle de poisson (gélatine) et du blanc d'Espagne qu'on recouvre de deux couches de blanc d'argent broyé à l'huile. On vernit le dos pour éviter l'humidité.

4° — Toiles.

On utilise la toile de lin tendue sur un cadre. On la prépare à la colle forte et au blanc d'argent broyé à l'huile.

Mode d'action et classifications empiriques des matières colorées.

209. **Définition et mesure des intensités des couleurs simples ou complexes.**

Une couleur *simple* est définie par sa longueur d'onde et par son intensité. Pour comparer les intensités relatives des diverses couleurs simples, nous posons qu'elles sont égales dans le *blanc*, c'est-à-dire dans la lumière solaire, supposée modifiée d'une manière négligeable par l'absorption atmosphérique. Les intensités des radiations simples sont non seulement égales, mais *égales à l'unité*, si l'intensité de la lumière blanche qui en est la somme, est elle-même égale à l'unité (c'est-à-dire produit l'éclairement d'une bougie-mètre).

Nos unités sont ainsi définies au moyen d'un spectre continu.

Dans un tel spectre, la quantité d'énergie qui correspond à chaque longueur d'onde, est infiniment petite. Mais c'est un fait d'expérience que les *radiations voisines dans le spectre produisent sur l'œil des actions continûment variables* ; nous pouvons donc compenser avec une radiation plus réfrangible la petite différence de ton qui résulte de l'addition d'une radiation moins réfrangible. Pour mesurer l'intensité

finie d'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ, nous superposons donc les radiations du spectre continu comprises entre les limites $\lambda - \Delta\lambda : 2$, et $\lambda + \Delta\lambda : 2$, jusqu'à obtenir des effets identiques avec la lumière simple et avec la lumière complexe.

Soit I l'intensité de la lumière blanche d'où provient le spectre.

L'intensité de la radiation simple de longueur d'onde λ est :

$$I.\Delta\lambda.$$

Dès lors il est naturel de prendre pour *symbole* d'une lumière *complexe* quelconque à spectre continu :

$$I\int f(\lambda).d\lambda.$$

Cette intégrale *symbolique* exprime que nous partons d'une lumière blanche d'intensité I, que, par un procédé quelconque, nous diminuons les intensités de toutes les radiations dans le rapport $f(\lambda)$ plus petit que l'unité, enfin que nous superposons sur la rétine le résultat de l'opération.

Dans cette manière de représenter analytiquement les teintes, le blanc a pour symbole :

$$I\int d\lambda.$$

Les limites de l'intégrale sont les longueurs d'onde limite du spectre visible. Il s'agit du reste ici d'un symbole, et non pas d'une somme au sens habituel du mot.

Pour prendre un exemple simple, ce qu'un verre coloré laisse passer par transparence quand on l'éclaire avec du blanc (§ 216), représente une couleur parfaitement déterminée. Le facteur $f(\lambda)$ par lequel le verre agit sur les diverses radiations, dépend de la composition et de l'épaisseur du verre.

210. Étude spectrale des radiations émises par les matières colorées.

On fera l'expérience avec des poudres agglutinées par une solution à 2 p. 100 de gélatine, *de manière qu'elles restent mates.* Sur la surface colorée, on envoie un faisceau intense de lumière électrique et on reçoit la lumière diffusée sur la fente d'un spectroscope, par exemple d'un petit spectroscope à vision directe qu'on tient à la main. Le lecteur pourrait être tenté de condenser cette lumière par une lentille; la théorie (voir mon cours d'*Optique Géométrique*) montre qu'on n'y gagne rien. Elle montre aussi qu'il importe peu qu'on place la fente du spectroscope près de la surface colorée, ou plus loin, à la condition de rester en deçà d'une certaine limite.

L'étonnement est grand de constater que la plupart des matières colorées, même les plus *franches*, loin de diffuser une radiation simple, émettent un spectre continu. La différence d'éclat des diverses parties

du spectre est souvent si peu marquée que l'apparence spectrale ne permet pas de reconnaître de quelle couleur est la surface qui émet. On exprime le fait en disant que *les matières colorées émettent des lumières peu saturées*; elles sont constituées par une certaine teinte spectrale plus ou moins pure, *largement lavées de blanc.*

Nous avons conseillé l'emploi de matières *mates* afin d'éviter la réflexion régulière qui diminue encore la saturation : nous verrons en effet que la lumière réfléchie est blanche.

Il n'y a aucun intérêt à déterminer exactement la composition des lumières émises par les matières colorées, ne serait-ce qu'en raison de sa variabilité d'un échantillon à l'autre. Mais il est nécessaire que le lecteur se rende compte de cette composition, s'il veut comprendre le résultat des mélanges des poudres colorées.

211. Superposition des couleurs sur la rétine. Disques colorés. Nous étudierons au chapitre suivant les méthodes qui permettent de superposer sur la rétine des radiations spectrales.

Avec les matières colorées, nous utiliserons le procédé systématisé par Talbot (§ 164) et Maxwell des *disques colorés tournants.*

Ce sont des disques de carton peints d'une teinte uniforme, percés d'un trou central (pour qu'on puisse les enfiler sur l'axe d'un moteur (§ 164) et d'une fente radiale. Cette fente permet d'assembler autant de disques qu'on veut, en donnant aux secteurs utiles de chacun une grandeur relative quelconque. La figure 183 représente trois disques qu'on a pris de rayons inégaux pour mieux faire comprendre l'assemblage. En vertu du principe de Talbot (§ 164), quand on met le triple disque en rotation rapide, on additionne (dans le cas de la figure 183) à une certaine quantité de la couleur A, des quantités sensiblement égales des couleurs B et C.

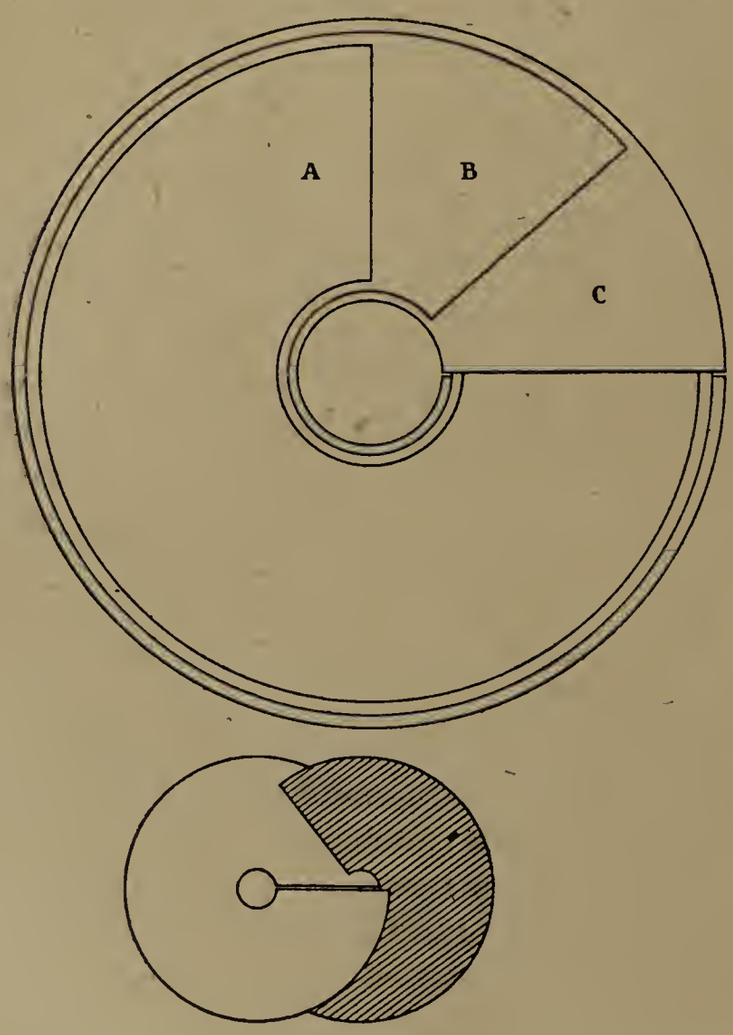


Fig. 183.

Seule l'épaisseur du carton dont on fait les disques, limite pratiquement le nombre de ceux qu'on peut combiner à la fois.

Comme moteur on se servira d'une petite dynamo pour ventilateurs. Dans le cas où l'on ne dispose pas d'une force électromotrice, on utilise simplement une toupie métallique massive pour mettre le disque en rotation.

Pour peindre les disques on utilisera les couleurs à l'huile (elles sèchent lentement), les couleurs pour aquarelle (elles couvrent mal), enfin les poudres colorées agglutinées par une solution de gélatine blanche à 2 p. 100. Dans ce dernier cas on maintiendra tiède la solution pour qu'elle ne prenne pas en gelée.

Les marchands de couleurs (Lefranc et Cie, 64, rue de Turenne, Paris), vendent les couleurs usuelles en poudre impalpable (par 100 grammes).

N. B. — La teinte des disques ne dépend pas de l'incidence.

Par hypothèse l'œil fixe un point déterminé du disque : la teinte est déterminée par la durée du passage en ce point de diverses couleurs.

Il faut seulement qu'elles soient également diffusantes pour toutes les directions.

212. Luminosité des matières colorées.

Plaçons sur l'axe du moteur un cercle uniformément recouvert d'une certaine matière colorée, et par-dessus le système de deux cercles plus petits, l'un noir, l'autre blanc, qui permet de réaliser un gris quelconque. Faisons tourner. Modifions le gris jusqu'à ce que les deux couronnes paraissent également lumineuses (§ 132).

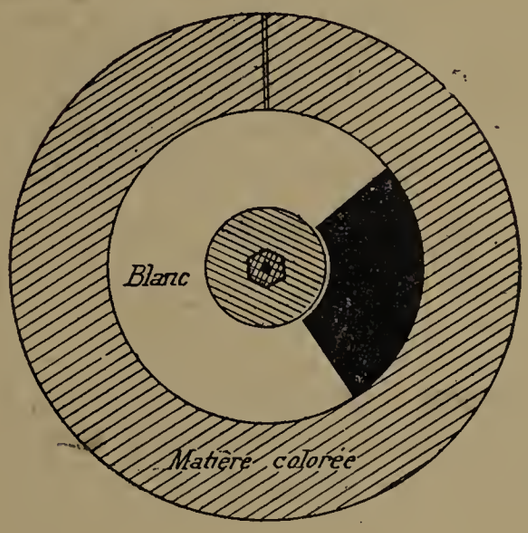


Fig. 184.

A la vérité l'égalité n'est pas obtenue avec une grande précision; peu importe pour le but poursuivi.

Le résultat est entaché d'une erreur du fait que le noir n'est jamais rigoureusement noir; il diffuse de 2 à 5 p. 100 de la lumière incidente. La correction est facile.

On trouve ainsi les luminosités suivantes, données seulement pour fixer les idées; elles se rapportent aux matières utilisées *elles-mêmes* :

Papier blanc	100	Vert émeraude clair	49
Vermillon	26	Bleu de cobalt	35
Jaune de chrome clair	80	Outremer	8

La preuve que les résultats ont une certaine valeur objective est fournie par les matières colorées *complémentaires* (§ 240). Réalisons

deux disques d_1, d_2 tels que par leur assemblage et leur rotation ils fournissent du blanc quand les secteurs s_1 et s_2 sont dans un certain rapport. On vérifiera que les luminosités déterminées comme ci-dessus satisfont à la relation prévue :

$$l_1 s_1 = l_2 s_2.$$

Il est, en effet, tout naturel que les couleurs qui sont *complémentaires* en raison de leurs compositions spectrales, fournissent du blanc par leur superposition sur la rétine quand leurs luminosités sont ramenées à être égales.

213. Noir absolu. Noirs du commerce.

1° — Voici d'abord comment on obtient du *noir absolu*; c'est l'application de la formule : *noir comme un four éteint.* Une caisse en bois C fermée de tous côtés, est intérieurement tapissée de velours noir ou enduite de noir de fumée agglutiné à la colle de pâte.

Fig. 185.

Dans une des faces on perce un trou; *pourvu qu'il ne soit pas trop grand, il est parfaitement noir.*

Pour obtenir un gris de valeur connue, on fait tourner devant ce trou un secteur blanc d'angle variable. Il est formé de deux secteurs B qu'on décale l'un par rapport à l'autre. Pour montrer leur agencement, ils sont représentés de diamètres différents. On les construira avec du carton recouvert de sulfate de baryte précipité et séché.

Pour déterminer le gris d'un disque G, on le monte sur l'axe en même temps que les secteurs blancs dont on modifie le décalage jusqu'à obtenir le même gris.

2° — Noirs du commerce.

La méthode précédente donne la valeur d'un noir puisque ce n'est qu'un gris très foncé.

Pour ne pas employer des secteurs blancs B d'angles trop petits, on les remplace par des secteurs d'un gris *connu*. Si ce gris vaut par exemple 0,1 du blanc (c'est-à-dire s'il diffuse le dixième de ce que diffuse le blanc dans les mêmes conditions d'éclairage), le secteur gris produisant le même effet que le secteur blanc, sera d'angle dix fois plus grand.

Les angles des secteurs blancs donnant les gris équivalents aux noirs du commerce varient de 8 à 10° suivant le substratum. Les noirs les plus noirs diffusent donc de 2 à 3 p. 100 de la lumière incidente.

Un beau noir industriel doit être plutôt bleu que rouge, cela en raison de la loi de Purkinje.

Les noirs *roux* (noirs de fumée) font mauvais effet.

214. Couleurs rabattues, couleurs lavées de blanc.

1° — Couleurs rabattues. Phénomène de Purkinje.

Utilisons deux disques l'un noir, l'autre (par exemple) vermillon; combinons-les (§ 211) de manière à modifier le rapport des secteurs noir et vermillon. A mesure que nous augmentons le secteur noir, nous *rabattons* la couleur. Nous constatons que *le ton rouge vif du vermillon vire au chocolat*; la modification est telle qu'il est bientôt impossible de deviner que le ton chocolat a quelque chose de commun avec le vermillon d'où il provient.

Projetons sur le double disque tournant la lumière intense d'un arc électrique : le chocolat redevient vermillon.

Conclusion : *pour une composition spectrale déterminée, le ton d'une couleur est une fonction parfois très variable de l'intensité absolue des radiations.* Cela revient à dire que les corps n'ont pas une couleur subjective définie : leur couleur dépend essentiellement de l'intensité absolue de la lumière *blanche* qui les éclaire.

C'est là une proposition fondamentale.

Au lieu d'un disque *vermillon* utilisons un disque *vert Véronèse*; combiné avec une quantité suffisante de noir, nous obtenons un beau *vert émeraude.*

Répétons l'expérience avec un disque peint en *jaune de chrome* : nous obtenons des tons verdâtres qu'avec la meilleure volonté du monde, on ne devine pas dérivés du jaune. Et ainsi de suite.

Les teintes les plus modifiées sont celles qui contiennent simultanément les couleurs extrêmes du spectre, comme on devait s'y attendre (§ 127). Les couleurs principales (§ 235) utilisées seules ne sont pas sensiblement modifiées.

2° — Couleurs lavées de blanc; saturation.

Combinons maintenant le disque vermillon ou vert Véronèse avec le disque blanc : nous changeons ce qu'on appelle la *saturation* du ton; le ton pâlit. Fait remarquable : ce délayage modifie moins profondément le ton que la variation de l'intensité absolue. On le retrouve encore dans la couleur blanchâtre obtenue quand le blanc prédomine.

3° — Erreurs provenant de l'éducation.

Nous devons faire ici une remarque importante.

Les couleurs nous servent à distinguer les corps; aussi les voyons-nous souvent comme il nous est utile de les voir et non pas comme elles sont.

Par exemple nous distinguons fort bien un papier gris violemment éclairé, d'un blanc qui l'est faiblement : nous nous servons des corps environnants pour acquérir une idée de l'intensité de l'éclairage ; nous savons alors par expérience quels aspects doivent présenter les papiers gris et blancs sous l'action de cet éclairage.

D'où le jugement que nous portons.

Pour éviter que les expériences antérieures influent sur le jugement, il faut s'arranger de manière que les points de repère nous manquent. Par exemple, peignons en gris un cercle sur une feuille de papier blanc ; avec un point lumineux et une lentille n'éclairons que ce cercle. Il nous est maintenant impossible de démêler la part de l'éclairage et celle de la nature de la surface du papier.

Ces considérations expliquent comment nous reconnaissons sans hésiter du vermillon dans une surface peinte de cette couleur que nous voyons dans la quasi-obscurité, alors qu'il nous est impossible de le reconnaître dans l'expérience du disque. Elles expliquent pourquoi nous attribuons aux couleurs une fixité de ton qu'elle sont extrêmement loin d'avoir.

A l'aide de la méthode du § 225, éclairons un petit champ rectangulaire pris sur un écran blanc; tout autour projetons de la lumière blanche *intense*.

Dans ces conditions le jaune du spectre paraît *brun*.

Cependant si faiblement lumineux que soit un spectre vu dans un spectroscope, son jaune nous semble toujours jaune.

215. **Disques de Talbot. Dégradés.**

1° — Dans les expériences précédentes l'emploi des disques de Maxwell exige qu'on arrête le moteur pour modifier le rapport des secteurs; les disques de Talbot donnent toute la gamme d'un seul coup.

Pour les obtenir, traçons la courbe d'équation polaire :

$$\theta = 360 \frac{\rho - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0}. \qquad (1)$$

La figure 186 suppose $\rho_0 = 0$; la figure 187 suppose $\rho_0 = 3$, $\rho_1 = 11$.

Pour construire la courbe (1), on divise par des rayons la circonférence en 8 et 12 parties égales (16 ou 24 pour raffiner); on trace 8, 12, 16 ou 24 circonférences équidistantes; on joint les points d'intersection des rayons et des circonférences pris respectivement dans le même ordre.

On peint en deux teintes différentes A et B respectivement les espaces limités par la courbe et le rayon origine.

Quand on le fait tourner le disque présente d'une manière continue et régulière tous les mélanges de A pur à B pur.

Pour répéter les expériences prenons pour A du vermillon, par exemple, et pour B du blanc ou du noir.

Dans le premier cas on a la gamme de la teinte A lavée de blanc

Fig. 186.

Fig. 187.

dans le second on a la teinte A d'intensité régulièrement décroissante jusqu'à zéro *à partir de l'intensité A*.

Si A est blanc, B noir, on a la série des *gris*.

2° — Dégradés.

On appelle *dégradation* le passage d'une teinte à une autre teinte à travers tous les intermédiaires.

Les levers et couchers de soleil nous offrent d'extraordinaires dégradés, allant du bleu verdâtre au rouge poupre.

Les disques de Talbot nous permettent d'obtenir entre deux teintes A et B les dégradés suivant une loi quelconque.

Plateau a indiqué un amusant procédé pour obtenir des dégradés. On peint le disque A avec les couleurs indiquées (par exemple). Le disque

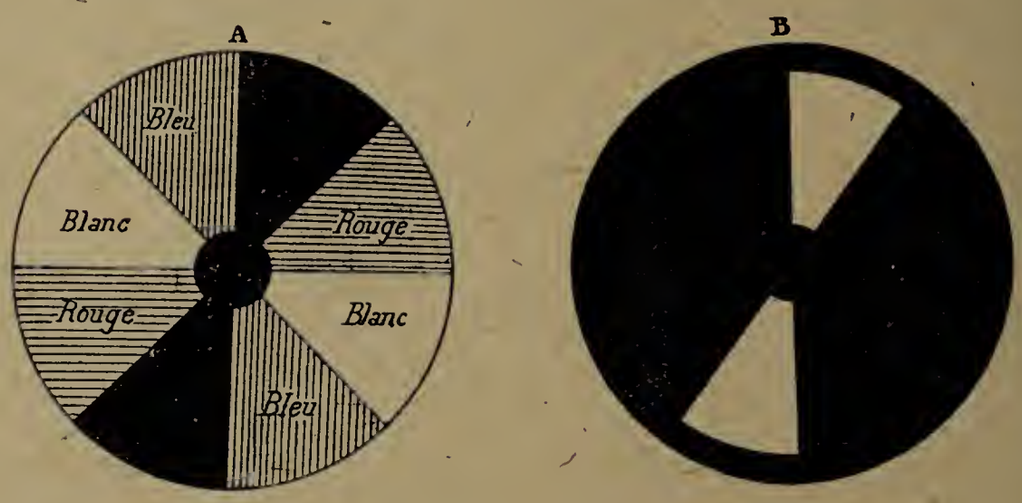


Fig. 187 *bis*.

noir B est ajouré comme le montre la figure (187 *bis*). Ils sont fixés contre deux poulies *égales*, montées folles sur le même axe : une corde sans fin les entraîne dans le même sens (fig. 163).

Si les poulies tournaient rigoureusement avec la même vitesse, la fenêtre du disque B recouvrirait toujours les mêmes parties du disque A; en raison de la persistance des impressions lumineuses, on aurait un cercle d'une couleur invariable. Mais pour égales que soient les poulies, elles ne le sont jamais absolument : un des disques avance donc par rapport à l'autre. D'où un changement continu de couleur qui produit de fort beaux effets.

Il est bon de colorer le disque de papier A des deux côtés, de le vernir de manière qu'il soit transparent, et d'éclairer par transmission.

216. Mécanisme de la coloration des matières colorées.

1° — La lumière blanche réfléchie par un verre coloré reste blanche; donc ce verre colore par transmission et absorption, non par réflexion. On obtient sensiblement la même teinte en regardant à travers un verre coloré, ou en pilant ce verre pour obtenir une poudre, à supposer bien entendu que le verre soit coloré dans sa masse, et non pas seulement recouvert d'une mince couche colorante (*verres doublés*). Cette poudre, agglutinée par un procécé quelconque, peut servir de *couleur* au sens où les peintres emploient ce mot.

Partant de là, voici comment il faut se représenter le mécanisme suivant lequel les matières colorantes donnent des couleurs.

De la lumière blanche tombe sur la poudre. Une partie des rayons incidents est réfléchie par les surfaces extérieures : sa teinte est voisine du blanc. Le reste pénètre dans la matière, est réfléchi dans toutes les directions (*diffusion*) par les surfaces intérieures, et sort *privé par absorption d'un certain nombre de radiations : d'où la couleur.*

On réalise en gros ce mécanisme en plaçant un verre coloré sur du papier blanc : le papier joue le rôle de réflecteur-diffuseur.

Abstraction faite de la lumière réfléchie par la face antérieure du verre, la lumière émise a traversé au moins deux fois la lame colorée.

Corrélativement les poudres sont d'autant plus colorées que les grains sont plus gros; elles sont d'autant plus blanchâtres que les grains sont plus fins. Le sulfate de cuivre dont les cristaux sont d'un beau bleu, donne une poudre fine qui est blanche : la lumière est réfléchie en totalité par de multiples réflexions, avant d'avoir traversé une épaisseur suffisante de matière pour être colorée d'une façon appréciable.

Le rôle des vernis est de transformer les poudres en pâtes et, par séchage, en couches plus optiquement homogènes; ils suppriment ainsi des réflexions intérieures trop superficielles; ils permettent aux couches profondes d'agir plus efficacement. Les couleurs paraissent plus foncées parce qu'on supprime les réflexions qui les noyaient de blanc; mais elles sont plus *riches*, plus *saturées*.

Pour que les liquides suppriment les réflexions, il faut que leur indice soit notable. Si tous les blancs couvrent dans la peinture à la colle, c'est à cause de la petitesse de l'indice de l'eau; ils ne couvrent plus tous dans la peinture à l'huile.

Le papier fait office de vitre quand on l'huile, le cire ou le paraffine. On substitue à l'air une substance dont l'indice de réfraction est voisin de celui des matières constituantes : elle ramène l'homogénéité optique.

Autre expérience : mettons du verre pilé dans un ballon : il est opaque. Introduisons un mélange en proportions convenables de sulfure de carbone ($n = 1,633$) et de benzine ($n = 1,497$) : nous ramenons la transparence.

2° — Cette théorie suppose les matières colorantes plus ou moins transparentes. Effectivement, en premier lieu, tous les corps sont transparents en couches minces (les pierres et les métaux par exemple); en second lieu, les poudres employées comme couleurs sont fort loin d'être parmi les corps les plus opaques.

Pour éviter une fausse généralisation, ajoutons que certains corps, parmi lesquels les métaux, colorent par réflexion : on dit alors que les couleurs sont *superficielles*. Mais ce n'est pas le cas des couleurs usuelles.

En définitive les substances employées comme couleurs privent la

lumière incidente de certaines radiations ; *elles agissent par soustraction.* Corrélativement elles sont moins lumineuses que le blanc. Elles le seraient même moins encore si la lumière qu'elles émettent, était simple : une substance jaune émet, non seulement du jaune, mais encore un mélange de rouge et de vert produisant sur la rétine le même effet que le jaune.

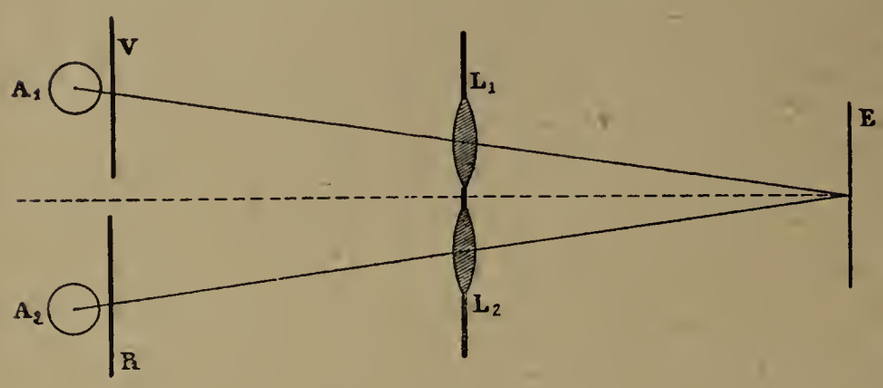


Fig. 188.

On dit que les poudres *diffusent* la lumière. L'explication précédente nous amène à considérer la diffusion comme une réflexion sur des surfaces très petites orientées dans tous les azimuts. Le peintre s'efforce de supprimer les réflexions régulières à la surface de son tableau, la lumière réfléchie étant à peu près rigoureusement blanche.

3° — La même théorie s'applique à la coloration des tissus. Les fibres de soie et de laine se colorent dans leur masse et présentent l'aspect de fils de verre. Il est nécessaire que les surfaces soient suffisamment réfléchissantes ; c'est en quoi la soie l'emporte sur la laine : la lumière qu'elle émet est plus saturée et plus intense.

Le *velours* supprime la lumière quasi blanche réfléchie par les surfaces extérieures : corrélativement on réalise avec le velours *de soie* des teintes magnifiques.

217. Mélange des poudres colorées.

1° — L'expérience suivante fixera les idées du lecteur. Au moyen des lentilles L_1 et L_2, projetons au même endroit de l'écran E les flammes des becs Auer A_1 et A_2. Recouvrons-les respectivement des verres *vert* V et *rouge* R. Nous *additionnons* ainsi sur l'écran les lumières transmises par ces verres. Pour un choix convenable de verres colorés, l'image obtenue est blanche : on dit que les couleurs des verres colorés sont *complémentaires.*

Supprimons un des becs ; superposons devant l'autre les deux verres colorés. L'image sur l'écran disparaît à peu près complètement. Le premier verre multiplie les intensités des diverses radiations de la lumière blanche par une certaine fonction $f_1(\lambda)$; la teinte émergente est représentée par le symbole :

$$\int f_1(\lambda) \, . \, d\lambda.$$

De même la teinte du second est représentée par le symbole :

$$\int f_2(\lambda) \, . \, d\lambda.$$

Dans la première expérience la teinte est symboliquement :

$$T = \int f_1(\lambda) \cdot d\lambda + \int f_2(\lambda) \cdot d\lambda = \int [f_1(\lambda) + f_2(\lambda)]\, d\lambda.$$

Dans la seconde elle est :

$$T' = \int f_1(\lambda) \cdot f_2(\lambda) \cdot d\lambda.$$

Si la fonction f_1 s'annule pratiquement pour toutes les valeurs non nulles en f_2, et inversement, on a pratiquement $T' = 0$.

2° — *Quand on mélange des poudres, on produit à peu près le même effet que quand on superpose des verres colorés.* La lumière qui sort, a traversé successivement des fragments des deux matières; elle est par conséquent plus ou moins dépouillée des radiations dont l'auraient privée les deux poudres agissant séparément.

Lors donc que le peintre mélange deux couleurs sur sa palette, il est infiniment loin *d'additionner* ces couleurs.

Corollaire : les mélanges de poudres colorées sont plus foncés que les substances isolées; la lumière incidente diffusée contient moins de radiations. D'où résulte que les couleurs obtenues par mélanges sont toujours *rabattues*.

Par exemple, on connaît des substances vertes (§ 201). Mais on vend aussi des verts *composés* obtenus par le mélange en proportions variables de chromate de plomb (jaune) et de bleu de Prusse (*verts anglais*). Ils sont loin d'être aussi francs que les verts de chrome. Le chromate de plomb supprime les violets de la lumière blanche, le bleu de Prusse supprime les rouges : ce qui reste donne la sensation de vert.

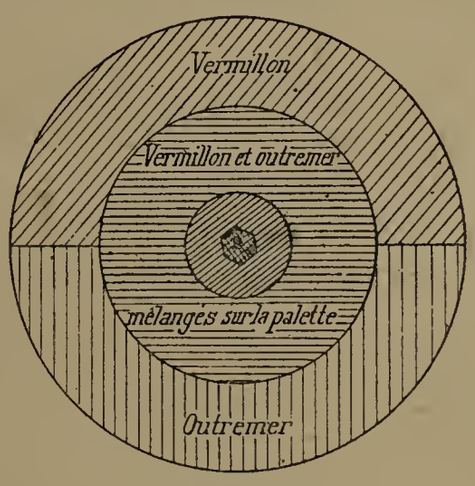


Fig. 189.

3° — La preuve que le mélange des poudres colorées n'agit pas par addition, est facile avec les disques.

On divise le disque en deux couronnes (fig. 189) : l'une est couverte moitié de vermillon, moitié d'outremer; l'autre est couverte du mélange de ces couleurs effectué sur la palette en quantités égales, mélange qui est noirâtre. On fait tourner le disque. La couronne centrale conserve évidemment sa teinte noirâtre; la grande couronne devient pourpre.

Cette expérience peut être variée de bien des manières.

4° — Le mélange des poudres colorées et la superposition des couches transparentes colorées (§ 217, *1°*) fournissent des teintes à ce point comparables qu'on a réalisé sur ce principe un appareil donnant une idée du résultat des mélanges.

On superpose des rondelles minces de gélatine colorée formant quatre gammes (rouge, jaune, bleue, grise); chaque gamme contient cinq tons plus ou moins saturés. Les rondelles sont collées sur quatre disques de laiton parallèles, percés chacun de cinq trous et tournant autour du même axe que porte un manche M (fig. 190). On regarde à travers le système une surface blanche assez lumineuse.

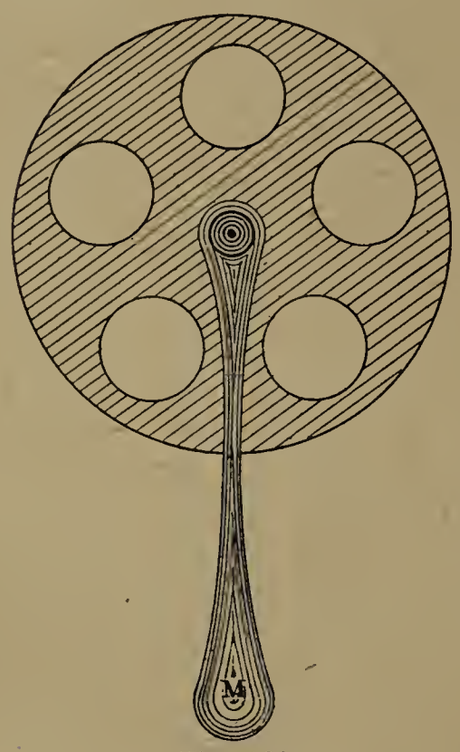


Fig. 190.

En combinant les rondelles, on réalise un nombre très grand de teintes.

5° — Voici une curieuse expérience.

Deux solutions l'une de vert d'aldéhyde dans l'alcool amylique, l'autre (rouge) d'un sel de cobalt dans l'eau ne se mélangent pas et ne réagissent pas l'une sur l'autre. Par l'agitation on obtient une émulsion qui laisse passer une lumière colorée. Par le repos les liquides se séparent. On varie la teinte résultante en modifiant la proportion des liquides.

Cette méthode pour réaliser des effets analogues à ceux des mélanges de matières pulvérulentes consiste en définitive à choisir des corps solubles dans l'alcool amylique et insolubles dans l'eau, ou solubles dans l'eau et insolubles dans l'alcool amylique, ces deux liquides ne se dissolvant pas.

218. Variation de la teinte d'un mélange suivant les matières employées.

A la fin du § 232, nous énonçons sur *l'addition* des couleurs une loi fondamentale qui correspond à l'expérience suivante.

Additionnons les lumières émises par deux disques recouverts de vermillon et de vert : nous obtenons du jaune. Changeons la nature de ce vert; le jaune résultant sera toujours le même, *à la seule condition que les verts utilisés aient même aspect, quelle que soit du reste la composition de la lumière qu'ils émettent.*

Plus généralement l'addition des couleurs de même aspect donne des couleurs de même aspect.

Il n'en est plus de même pour le mélange des poudres colorées.

Par exemple, les peintres obtiennent leurs verts par mélange d'un jaune et d'un bleu. L'expérience montre que, les bleus employés seraient-ils rigoureusement de même aspect, si les lumières qu'ils émettent n'ont pas la même composition spectrale, ils donnent avec le même jaune des verts très différents.

Je reviendrai là-dessus au § 248.

219. Variation de la composition objective dans le mélange de poudres blanche et colorée.

1° — On mélange une poudre colorée avec des quantités croissantes de blanc (*sulfate de baryte, craie,...* pulvérulentes). *Abstraction faite du blanc surajouté*, on demande si la composition varie. Autrement dit, obtient-on par ce procédé les mêmes effets qu'en associant un disque coloré avec un disque blanc, et en modifiant le rapport des sections?

L'assimilation des effets des poudres colorées par diffusion et des verres colorés par transmission force à répondre par la négative.

Soit x l'épaisseur d'un verre coloré; soit α' et α'' les coefficients d'absorption relatifs à deux radiations.

L'intensité de la lumière incidente étant prise pour unité et abstraction faite de la quantité réfléchie, les intensités transmises sont :

$$\exp(-\alpha' x), \qquad \exp(-\alpha'' x).$$

Le rapport est : $\exp.\,[-x(\alpha' - \alpha'')]$.

Il varie donc avec l'épaisseur.

Pour une épaisseur très petite, le rapport est quasiment égal à l'unité : *toute substance prise sous une épaisseur assez faible est quasiment incolore.*

A mesure que l'épaisseur croît, la teinte se sature.

Pour une épaisseur suffisante, seules passent en quantités non négligeables les radiations pour lesquelles le coefficient d'absorption est le plus petit.

Donc la teinte varie.

2° — On peut montrer l'exactitude de la théorie précédente de deux manières.

a). On compare le résultat de l'addition des lumières émises par deux disques, l'un recouvert de la couleur A saturée, l'autre de blanc B, avec la couleur d'un disque recouverts d'un mélange de la poudre A avec du blanc (poudre A). Il est impossible de trouver un rapport des secteurs qui rende les teintes identiques.

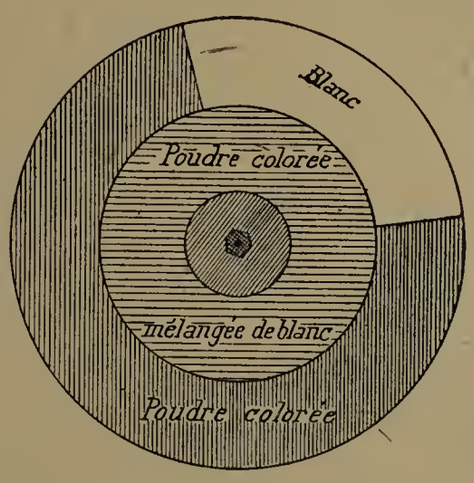


Fig. 191.

b). Soit trouvée une poudre B dont la couleur additionnée à celle de la poudre A, donne du blanc. Autrement dit, deux disques sont recouverts des poudres A et B; par hypothèse, ils fournissent du blanc pour une certaine valeur du rapport B : A des secteurs.

Mélangeons la poudre A avec du blanc, recouvrons un disque du mélange A_1 et associons-le au disque B. Si les lumières émises par la poudre A et par la poudre A_1 ont même composition objective (abstrac-

tion faite du blanc ajouté), nous devons retrouver du blanc pour un certain rapport B : A, des secteurs, rapport évidemment plus petit que précédemment. L'expérience montre que nous ne retrouvons du blanc pour aucun rapport. Les lumières A_1 et B ne sont donc plus complémentaires.

3° — Il est intéressant de préparer soi-même des feuilles de gélatine *colorée*.

On part de la gélatine blanche *comestible*. On la fait gonfler dans l'eau froide pendant 10 minutes: on rejette l'eau et l'on chauffe au bain-marie. On délaie la couleur; on verse le liquide coloré sur des glaces très propres et *talquées*, maintenues bien horizontales.

La gélatine se fige; on laisse sécher 48 heures.

On incise alors les bords avec un canif et on détache en soulevant par un angle.

Pour obtenir la teinte voulue, on peut superposer plusieurs feuilles.

220. **Pointillisme.**

Le mélange des poudres colorées n'additionne pas les couleurs. Il est cependant possible d'obtenir avec de la peinture une addition véritable.

Disposons des points de deux couleurs très près les uns des autres, de manière que leur mélange soit intime et que dans chaque centimètre carré le rapport des aires respectivement couvertes par les deux systèmes de points soit invariable.

Regardons, en nous plaçant à une distance suffisante.

Nous ne distinguons plus les limites des régions colorées; sur la rétine nous recevons simultanément les radiations émises par les deux systèmes de sources, et cela d'autant mieux que le point de fixation se déplace constamment (§ 62).

Les couleurs sont donc additionnées au sens des physiciens.

On fait l'expérience avec du papier blanc sur lequel on trace au tire-ligne deux systèmes de gros traits parallèles, avec de l'encre rouge et de l'encre verte; on s'arrange de manière que les traits soient en contact les uns des autres. A distance le papier paraît jaune.

Nous verrons que la photographie en couleurs (§ 339) réalise très exactement la théorie pointilliste.

Les peintres utilisent ce système pour faire « vibrer ». Ils juxtaposent les couleurs par « touches », indistinctes à la distance où la toile est habituellement regardée. Ils réalisent ainsi certains effets de lointains, d'eau en mouvement, de nuages,... avec une douceur, une légèreté, un flottant que ne donnerait pas un mélange homogène.

La peau du caméléon est munie de nombreuses vésicules pleines de liquides rouge, jaune et noir. Il peut distendre plus ou moins ces vésicules pour assortir sa couleur à celle des objets environnants. La gamme des couleurs qu'il obtient, comprend le rouge, les bruns (rouge et noir)

l'orangé (rouge et jaune), le vert olive (jaune et noir). Il fait du pointillisme à sa manière.

221. **Couleurs fondamentales des peintres. Palette usuelle.**

1° — Voici d'abord les six couleurs qui reproduisent le plus exactement les couleurs spectrales moyennes; nous engageons le lecteur à en acheter un tube pour bien les connaître.

F	Rouge.	Vermillon.
	Orangé.	Jaune de cadmium foncé.
F	Jaune.	Jaune de cadmium clair.
	Vert.	Vert Véronèse.
F	Bleu.	Bleu de cobalt.
	Violet.	Violet de cobalt.

L'expérience montre qu'*en pratique et à la condition de n'être pas trop sévère, toutes les couleurs peuvent s'obtenir par des mélanges en proportions convenables d'un* ROUGE, *d'un* JAUNE *et d'un* BLEU. En d'autres termes, les peintres peuvent à l'extrême rigueur constituer leur palette avec du blanc, du noir et les trois matières colorées ci-dessus marquées d'un F.

En fait ils se gardent de réduire ainsi leurs ressources; leur palette normale comprend une quinzaine de couleurs, y compris le blanc et le noir. En effet, à supposer tous les tons réalisables avec les trois couleurs fondamentales ci-dessus choisies (ce qui n'est pas rigoureusement exact), ils sont toujours moins éclatants, plus ternes, *plus sales* obtenus par mélange que réalisés par des matières de couleur franche.

Nous développons plus loin la théorie d'Young-Maxwell dont voici l'énoncé : *On obtient toutes les sensations colorées par l'addition sur la rétine en proportions convenables des effets de trois radiations simples de longueurs d'onde bien déterminées, une* ROUGE, *une* VERTE, *une* BLEUE.

Pour voisins que semblent les deux énoncés précédents (à la différence du vert remplaçant le jaune), ils n'ont *a priori* aucun rapport, le mélange des couleurs matérielles et l'addition des faisceaux colorés étant des opérations quasiment inverses.

Nous montrerons comment s'explique l'énoncé des peintres, qui du reste ne signifie rien de précis, puisque rien n'est moins déterminé que le rouge, le jaune et le bleu de leur théorie.

Comme matières colorées fondamentales, on a successivement choisi :

le cinabre,	le chromate de plomb,	le bleu de cobalt;
le carmin,	la gomme-gutte,	le bleu de Prusse;
le vermillon,	le jaune de cadmium,	le bleu de cobalt.

2° — Les peintres n'ont garde de se limiter à trois couleurs. Parmi les 150 qu'offre le commerce, le plus grand nombre est nettement instable; quelques unes sont parfaitement stables. Enfin les couleurs d'un troisième groupe sont sujettes à contestation : admises par certains

peintres, elles sont accusées par d'autres de noircir, de pâlir, de ternir, de verdir, de manger les voisines,... En bonne logique il faudrait revenir à la palette de Léonard de Vinci et de Raphaël qui par surcroît faisaient broyer leurs couleurs dans leurs ateliers.

Mais nous n'en sommes plus à travailler pour l'immortalité.

Quoi qu'il en soit, voici les couleurs les plus employées.

Jaune de Naples.	Laque de garance.	Terre de Sienne brûlée.
Ocre jaune.	Carmin brûlé.	Terre de Sienne naturelle.
Jaune de cadmium clair.	Vert émeraude.	Violet de Mars.
Jaune de cadmium foncé.	Bleu de Cobalt.	Violet de Cobalt.
Jaune indien.	Bleu d'outremer.	Bitume de Judée.
Vermillon.	Bleu de Prusse.	

222. Pyramide de Lambert.

1° — Disons quelques mots de la *Pyramide* de *Lambert*, ne serait-ce que pour qu'on ne la recommence pas.

La méthode consiste à mélanger en proportions variables trois

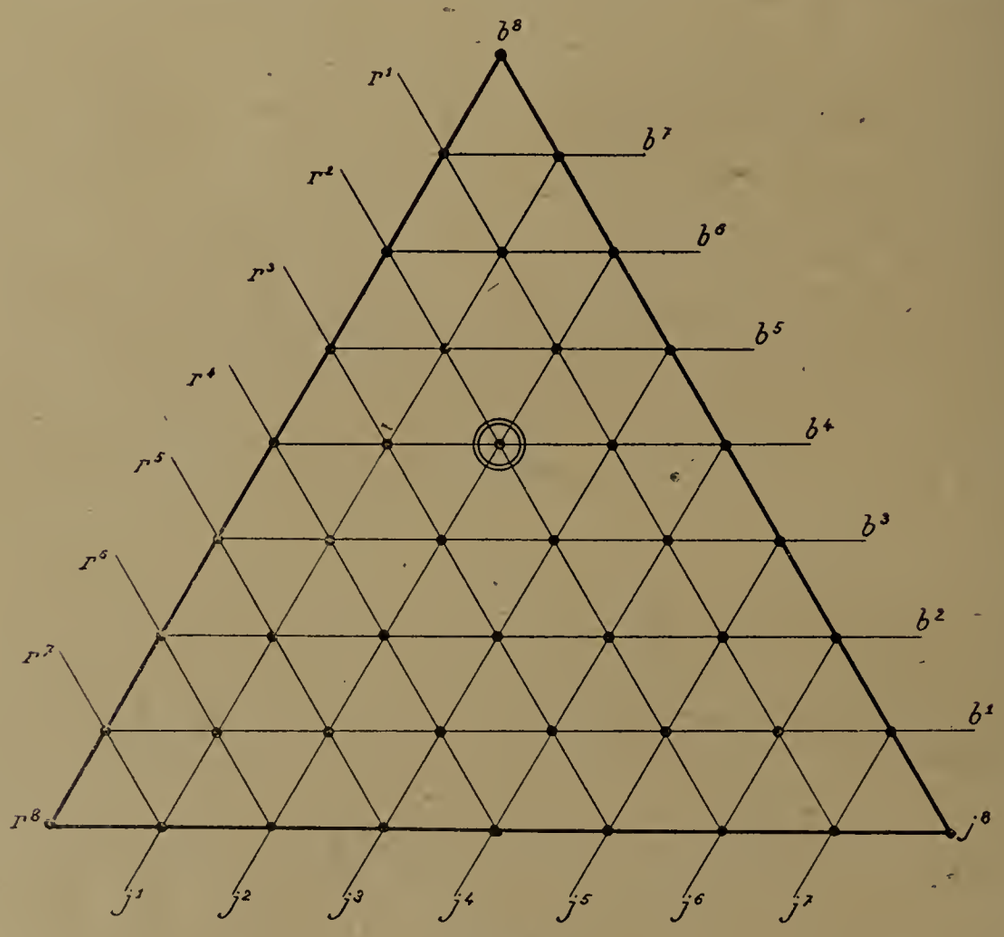


Fig. 192.

matières colorées, une *rouge* (laque de cochenille), une *jaune* (gommegutte), une *bleue* (bleu de Prusse), et à cataloguer les résultats des mélanges.

Appelons r, j, b, les *équivalents* en grammes des matières colorées employées, déterminés comme nous le verrons tout à l'heure.

Le symbole $r^2\ j^2\ b^4$, par exemple, signifie que le mélange contient 2 fois le poids r de rouge, 2 fois le poids j de jaune, 4 fois le poids de b de bleu; c'est exactement le procédé de construction des formules chimiques.

Ceci posé, Lambert construit un premier triangle équilatéral (fig. 192) contenant 45 teintes, c'est-à-dire tous les mélanges $r^n\ j^m\ b^q$ qui satisfont à la condition $n + m + q = 8$. Par exemple, au point entouré d'un double cercle correspond le mélange $r^2\ j^2\ b^4$: c'est le *noir*.

On détermine les poids r, j, b, par la condition que les mélanges $r^4\ j^4$, $j^4\ b^4$, $b^4\ r^4$, soient un orangé, un vert, un violet, les plus francs possibles.

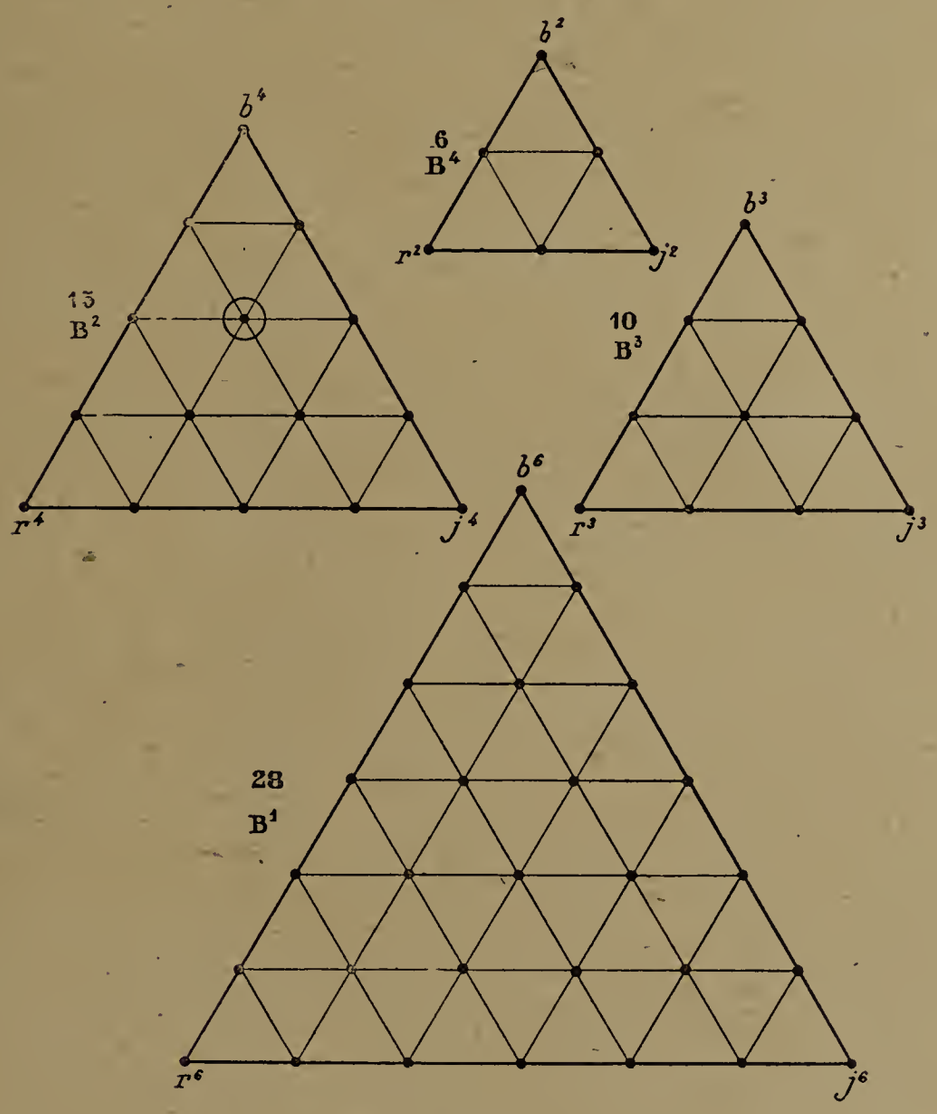


Fig. 193.

Lambert trouvait par exemple pour le laque de cochenille, la gomme-gutte et le bleu de Prusse *qu'il employait* : $r = 2$, $j = 12$, $b = 3$.

C'est dire que pour obtenir le vert le plus franc, il fallait mélanger le poids 4 de gomme-gutte avec le poids 1 de bleu de Prusse.

La base de la pyramide contient 3 couleurs primaires, 21 binaires et 21 ternaires, soit en tout 45.

2° — Lambert superpose à cette base des plans sur lequel il mélange les matières colorées de plus en plus chargées de blanc.

Comme à mesure que le blanc domine, les couleurs sont moins faciles à distinguer, on peut réduire le nombre des teintes.

Les étages successifs de la pyramide contiennent respectivement :

45, 28, 15, 10, 6, 3, 1 teintes.

Cette dernière teinte est du blanc pur noté B^6.

Suivant la méthode de notation expliquée ci-dessus, les trois teintes du sixième étage sont $r\ B^5$, $j\ B^5$, $b\ B^5$.

La teinte entourée d'un cercle dans la figure 193 en haut et à droite est $r\,j\,b^2\ B^2$. Et ainsi de suite.

3° — En admettant la pyramide réalisée, elle n'a d'autre intérêt que de représenter le résultat des mélanges en proportions connues de trois matières *particulières*. C'est une table de matières colorées; ce n'est pas une table des couleurs. Son empirisme est systématique; mais il n'a pas davantage de base scientifique que s'il ne l'était pas.

223. Classification empirique des matières colorées. Tables de Chevreul.

1° — Il paraissait naturel de dresser une table *matérielle* des couleurs. Toutes les tentatives ont échoué parce que le problème est insoluble.

Parmi ces essais le plus burlesque est celui de Chevreul, publié avec le titre suivant : *Sur le moyen de nommer et définir les couleurs.*

Qu'il ne se soit alors rencontré dans notre « illustre » Académie des Sciences quelqu'un pour lui dire que c'était idiot, donne de cette compagnie une idée juste mais peu favorable.

Chevreul confondait les *corps colorés* et les *couleurs*; il dressait un *catalogue de corps colorés* et s'imaginait avoir une *table des couleurs.*

Comme l'essai de Chevreul est encore « classique », j'indiquerai comment opérait notre « illustre » directeur des Gobelins; en abrégeant, car son mémoire est long comme sa vie.

2° — Je ne conteste pas l'utilité pour la fabrique des Gobelins d'avoir un moyen de repérer ses laines. Qu'elle pousse le scrupule jusqu'à en distinguer 14 400, prouve avec quelle conscience sont utilisés les deniers de l'État et combien l'industrie privée est redevable à nos fabriques nationales. Pour donner à mon éloge tout son prix, il suffit d'ajouter qu'on estime seulement les tapisseries d'il il y a plusieurs siècles, les autres ne servant qu'aux cadeaux officiels.

Chevreul choisit donc 72 couleurs *franches*; il fait longuement observer qu'il en prend 72 comme il en prendrait un nombre quelconque.

Il les distribue le long d'un cercle. Sur les 72, 60 sont les couleurs spectrales; il ajoute 12 pourpres entre le violet et le rouge.

Tout cela, qui n'a rien de neuf, est absolument arbitraire.

L'idée de compléter par des pourpres la série spectrale pour obtenir une série *fermée*, est vieille comme le spectre.

Mais existe-t-il une raison scientifique pour partager le cercle comme

Chevreul le fait. Pourquoi 12 parties pour le pourpre et 60 pour les couleurs spectrales? pourquoi l'égalité linéaire des orangés et des jaunes? Tout cela, *qui peut être fort bien pour classer des laines*, n'a aucune base physique.

Au surplus pourquoi discuter quand il suffit de transcrire? « On a choisi trois échantillons de *rouge*, de *jaune* et de *bleu* aussi francs, aussi purs que possible.... On les a mis à égale distance sur la table ronde, puis on a intercalé de l'*orangé*, du *vert* et du *violet*, de manière que l'*orangé* partageât également l'intervalle compris entre le *rouge* et le *jaune*....

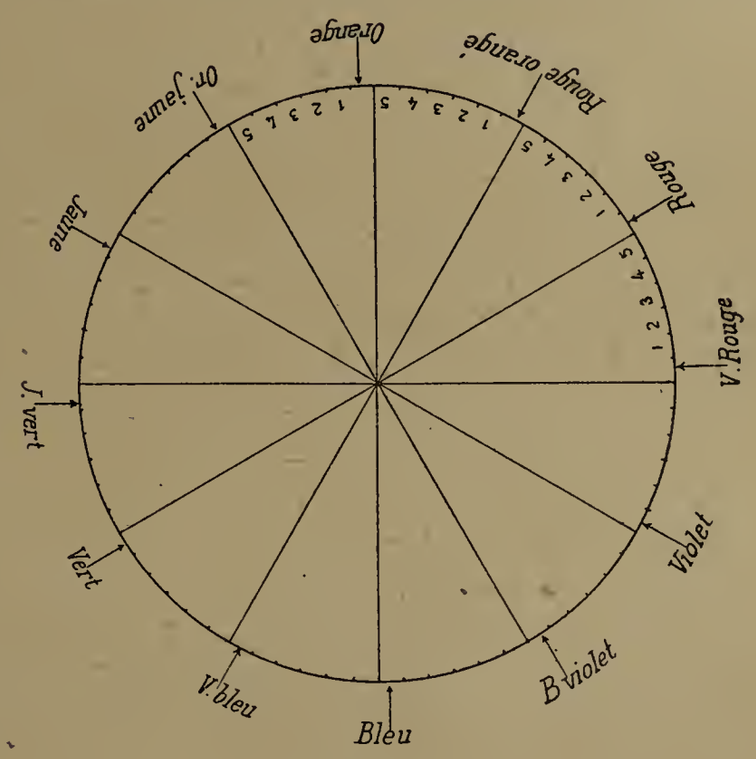


Fig. 194.

« J'ai prié quatre personnes, habituées dès l'enfance à apprécier les couleurs des laines et des soies teintes employées pour les tapisseries des Gobelins, de se réunir pour juger ensemble si chacune des 72 gammes était également distante de ses deux voisines, et c'est à l'unanimité que les types ont été admis. »

A la vérité cette méthode de classer les couleurs par un vote de contremaîtres, en présence de leur chef auteur de la classification, ne dépare pas nos Institutions nationales : c'est d'une manière analogue que se font les avancements dans l'Enseignement Supérieur. Pourtant je n'aurais pas voulu priver le lecteur de cette perle; il est bon qu'il sache d'où l' « illustre » savant a tiré son « admirable » table des couleurs. Je ne songe certes pas à empêcher les Gobelins de voter et d'être unanimes dans leurs votes; mais je trouve excessive la platitude de l'Institut qui imprime à grands frais de telles histoires et ne sait pas distinguer une classification empirique d'une œuvre scientifique.

3° — Ce qui précède ne serait rien. Voici où intervient l'erreur capitale.

Chevreul fait une *table de laines colorées* à partir de ses 72 couleurs *franches. Il rabat chacune d'elles par un, deux, trois... dixièmes de* noir. Scientifiquement parlant, cela ne peut avoir que le sens suivant : recevant toutes une lumière blanche de MÊME intensité, les laines renvoient des mélanges de MÊME composition, mais où les intensités *relatives* sont multiptiées par 10, 9, 8... 0 dixièmes.

Classer des *laines colorées* par cette méthode a un sens bien défini; classer des *couleurs* est idiot, et cela pour deux raisons.

La première est que nous avons choisi arbitrairement les luminosités des *couleurs franches*. Prenons une série de laines qui n'émettent que le jaune du sodium : leurs couleurs sont également *saturées*, mais leurs *luminosités* peuvent différer beaucoup. Pourquoi choisir comme étalon cette laine plutôt que cette autre? Qui ne voit qu'au moment où nous parlons de *rabattre* une couleur, c'est-à-dire de diminuer la lumière émise sans changer sa composition, la luminosité du point de départ intervient?

La seconde est qu'il suffit de doubler l'intensité de la lumière incidente pour que la laine rabattue à 5 dixièmes de noir devienne identique à celle qui était précédemment franche par définition. De sorte que, du matin au soir, sous l'influence des variations d'éclairement solaire, les tables des couleurs rabattues changent constamment de positions *absolues*.

Mais direz-vous, cela n'a pas d'importance puisque leurs positions *relatives* restent inaltérées! C'est exact, s'il s'agit de classer des laines colorées; c'est faux, s'il s'agit de classer des couleurs.

4° — Enfin Chevreul délaye ses couleurs franches avec du blanc. Mêmes remarques que ci-dessus; inutile d'insister.

Il faut croire du reste que l'obtention des couleurs lavées de blanc a présenté quelques difficultés, puisque le recueil des tables imprimées que j'ai sous les yeux (Typographie Didot, 1861) ne contient qu'un spécimen en bleu. On y trouve seulement les couleurs franches et les couleurs rabattues.

Chevreul ne nous cache pas que l'intercalation des neuf tons rabattus entre le noir et la couleur franche fut laissée au goût de l'artiste. Les physiciens savent qu'il suffit de regarder la table des couleurs franches à travers le système de deux Nicols pour obtenir ce que *devraient être* les neuf autres en vertu de leur définition : proposition incontestable pour les personnes qui posent que *le noir n'est pas une couleur*. Parmi celles-ci, je range tous les physiciens, mais je ne range pas Chevreul : il nous apprend que le noir se comporte comme un bleu foncé.

En définitive Chevreul avait un œil excellent, classait admirablement ses laines, mais ne disait que des sottises quand il jouait au physicien. Son observation que *les couleurs rabattues virent au bleu*, c'est le phénomène antérieurement connu de Purkinje (§ 127), mais expliqué tout de travers. Il y a un monde entre dire que le noir est bleu, et dire que les couleurs virent toutes au bleu quand on diminue leur intensité jusqu'à zéro.

A la page 78 de son mémoire, il rapporte le fait sur lequel j'insiste au § 214 et qui suffit à montrer l'impossibilité de réaliser *matériellement* une table des couleurs : *suivant l'intensité une couleur de composition donnée change de nom*.

224. Tables de matières colorées.

Il est très utile de construire, *empiriquement et sans prétention scientifique*, des tables de substances colorées à l'usage des divers métiers. Il est naturel de les construire avec des laines aux Gobelins, avec des papiers imprimés chez les éditeurs, avec les couleurs mêmes à classer chez les marchands de couleurs,... de manière que les comparaisons soient plus faciles. Le lustre, la matité des tons, le pelucheux ou le poli du substratum, toutes ces circonstances indépendantes de la couleur, quand elles sont différentes, gênent les comparaisons.

La comparaison consiste à dire que telle substance se conduit comme tel degré de l'échelle, sous l'influence du même éclairage (que nous pouvons supposer blanc, pour nous borner aux conditions ordinaires des applications). Recevant un faisceau de lumière blanche, la substance et le corps de comparaison doivent émettre des lumières de même composition et de même intensité. L'intensité du faisceau incident peut être quelconque, puisqu'il y a proportionnalité entre la lumière incidente et la lumière diffusée.

Voici un exemple intéressant de table de substances colorées.

J'ai sous les yeux une boîte contenant 252 pastels de nuances différentes. Le marchand (Lefranc et Cie, rue de Turenne, Paris) livre en même temps que la boîte un catalogue de 308 nuances; chacune d'elles est représentée par un échantillon de 2 centimètres carrés de papier couché dont la surface a exactement l'aspect du pastel dont il rappelle la nuance.

Pour chaque matière colorante, les tons sont classés à partir du plus saturé (1er ton) jusqu'au moins saturé; suivant la nature du premier, il y a un nombre de tons qui est généralement sept, parfois moindre.

Le numérotage est arbitraire; la classification n'a aucune prétention scientifique. Cela ne veut pas dire qu'une telle collection de nuances ne soit pas infiniment précieuse et intéressante à regarder.

Il est sot de fourrer la Science là où elle n'a que faire. Pour les matières colorées une classification empirique commode est tout ce qu'on peut espérer. Je lis partout que la table de Chevreul, telle qu'elle est aux Gobelins, est un admirable document. Je n'y contredis pas, pourvu qu'on la prenne pour ce qu'elle est : *un catalogue de laines colorées arbitrairement numérotées.* Son utilité est en proportion de la fidélité des copies qu'on en a, et non pas de sa valeur scientifique qui est nulle. Par conséquent je trouve stupides les gens qui la veulent perfectionner (Chevreul avait la prétention de placer sur le même diamètre les teintes complémentaires; il s'est lourdement trompé) : le devoir essentiel d'un tel catalogue est de rester autant que possible immuable.

CHAPITRE VII

VISION COLORÉE

Ce chapitre est divisé en deux parties.

Dans la première nous étudions le moyen de réaliser un faisceau lumineux contenant les radiations dans des rapports connus; l'étude des couleurs est objective; les résultats sont susceptibles de vérifications numériques précises.

Dans la seconde partie, nous cherchons à prévoir et à représenter les sensations produites par un faisceau de composition connue. L'étude des couleurs est subjective; les résultats sont moins précis et plus sujets à contestation.

Étude objective des faisceaux lumineux colorés.

225. Obtention d'une lumière de composition connue. Méthode de Newton.

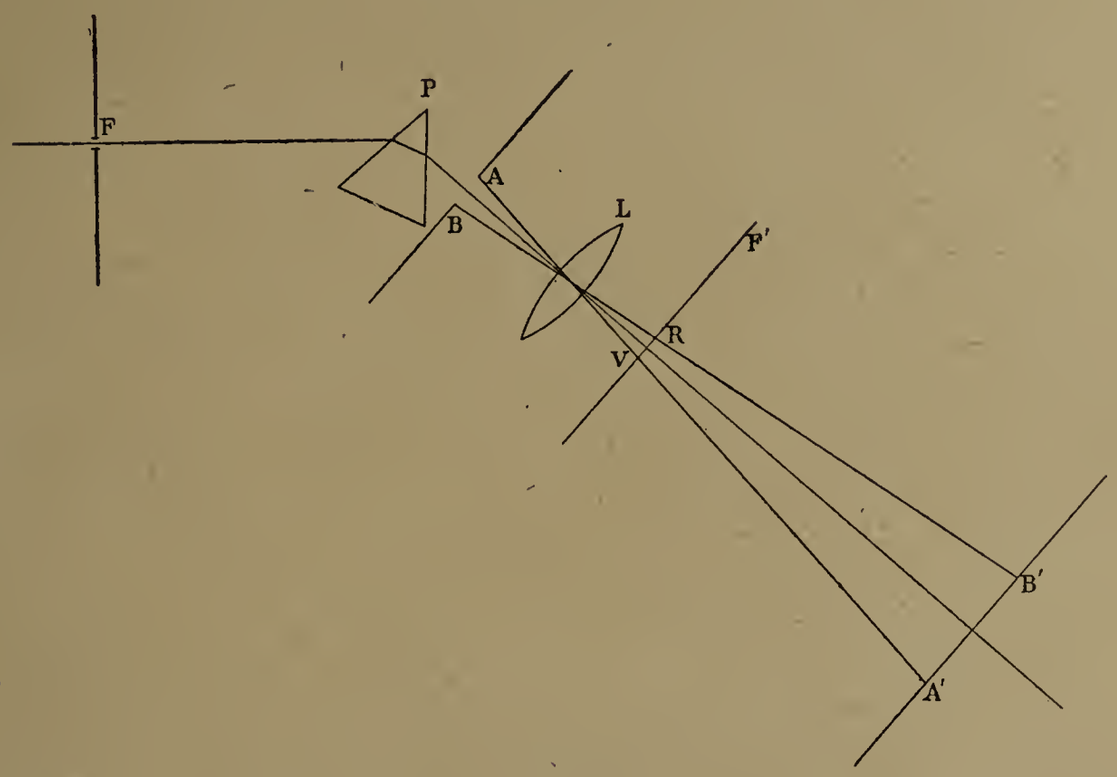
1° — On dispose une fente F, un prisme P et une lentille L (fig. 195) comme pour obtenir un spectre pur, avec cette différence que la lentille est assez éloignée du prisme. Tout près du prisme est un écran percé d'un trou rectangulaire AB. En F′ est le plan conjugué de la fente F par rapport au prisme et à la lentille; en A′B′ est le plan conjugué de AB par rapport à la lentille.

Le trou AB est assez petit pour que la lumière n'y soit pas encore dispersée, *même sur les bords* : l'image A′B′ est *blanche*, ou plus exactement de la couleur du faisceau qui éclaire la fente F.

En RV se forme un spectre pur.

L'expérience est intéressante comme montrant la possibilité de groupements différents des faisceaux lumineux. La lumière d'un certain λ, émise par un point de la fente F, éclaire à peu près uniformément la plage AB; elle converge ensuite en un point du plan F′ (spectre pur) et éclaire enfin à peu près uniformément la plage A′B′. Réciproquement la lumière émise par un point de AB jouant le rôle d'objet lumineux, se répartit à peu près uniformément sur RV et converge en un point de A′B′.

A l'aide de petites baguettes servant d'écrans, supprimons les radiations de certains λ dans le spectre; l'image A'B' est uniformément privée de ces rayons; elle apparaît colorée d'une certaine teinte plate.



ig. 195.

2° — L'appareil est monté comme l'indique la figure 196. Le spectroscope ordinaire formé d'un collimateur C, d'un prisme P, et d'une lunette L dont on enlève l'oculaire, donne un spectre réel F' devant un

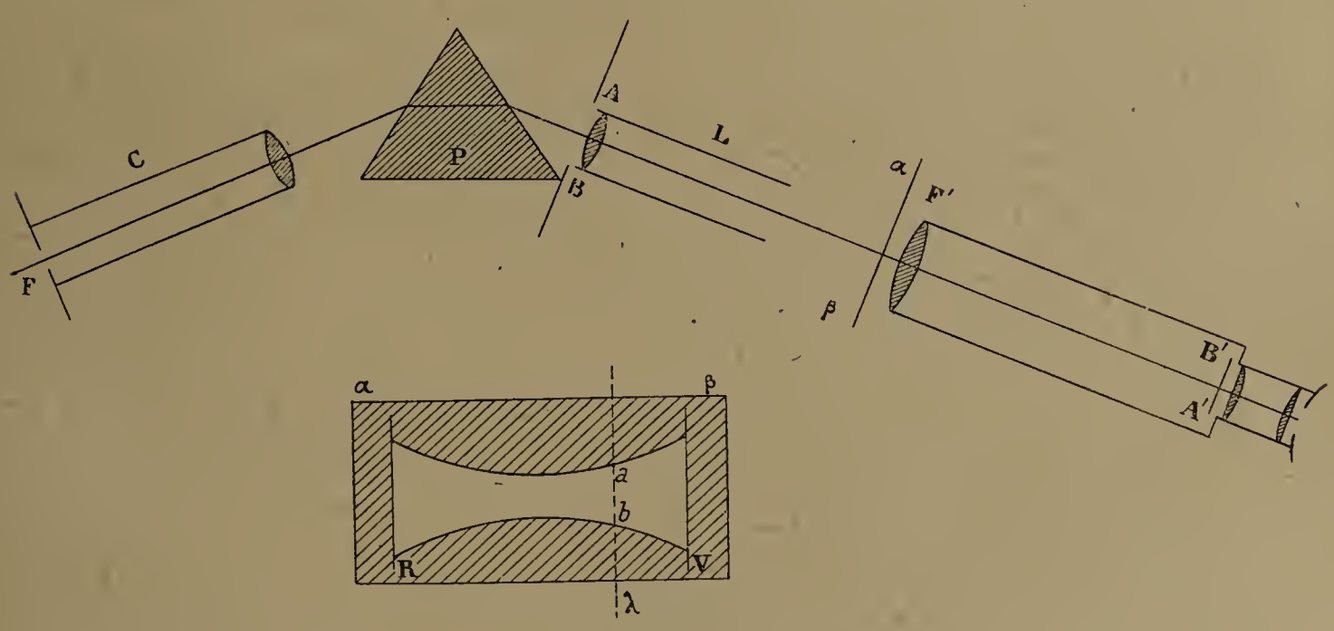


Fig. 196.

viseur avec lequel on regarde l'image virtuelle du trou AB donnée par l'objectif de la lunette. On obtient en A'B' une image qui est blanche quand on ne diaphragme pas le spectre réel.

Pour diaphragmer ce spectre, on introduit dans le plan F' une glace

sans tain, rendue opaque en partie au moyen d'encre de Chine ; on peut ainsi prendre de chaque radiation A une quantité proportionnelle à l'ordonnée *ab* laissée libre.

Bien entendu, le spectre n'étant pas normal, dans le calcul des courbes qui limitent l'encre de Chine, on introduit la dispersion, comme il est expliqué au § 237.

226. Obtention d'une lumière de composition connue. Appareil de Maxwell.

Le dispositif de Maxwell est beaucoup plus commode.

1° — Une fente F, une lentille L, un prisme P donnent un spectre

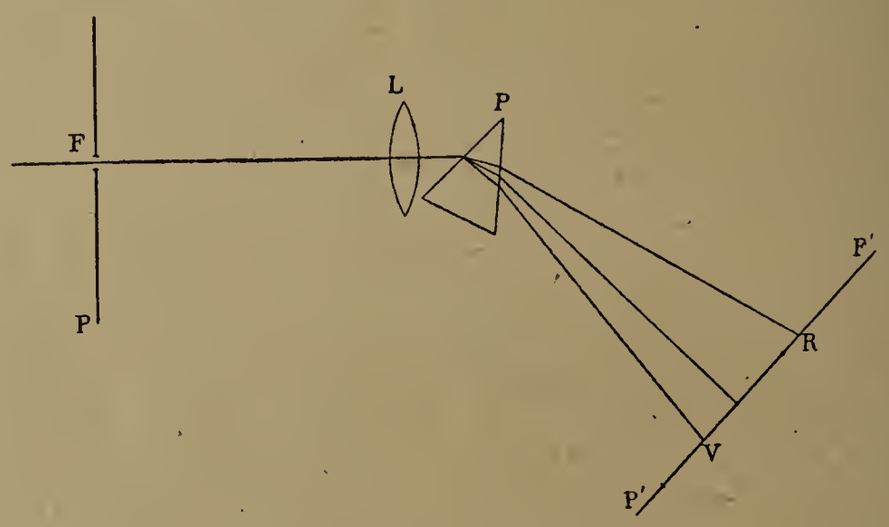


Fig. 197.

pur RV ; les plans P et P′ sont conjugués par rapport au prisme et à la lentille.

Réciproquement, si on place en R une fente éclairée par de la lumière blanche, il se produit dans le plan conjugué P un spectre pur *dont le rouge est en* F. Plus généralement, si on place une fente là où dans le spectre pur RV sont les radiations de longueur d'onde λ, il se forme dans le plan conjugué P un spectre pur dont les radiations λ coïncident avec la fente F.

On a donc un moyen commode de recomposer la lumière blanche.

On éclaire uniformément avec de la lumière blanche le plan P′ formé d'une substance translucide et parfaitement diffusante ; en F on reçoit *simultanément* : la radiation λ_1 d'un spectre que donnerait une fente placée sur RV aux points correspondant à λ_1 ; la radiation λ_2 d'un spectre que donnerait une fente placée sur RV aux points correspondant à λ_2 ;... La superposition de toutes ces radiations constitue la lumière blanche. Il faut que les différents points du plan P jouent le rôle de sources identiques ; d'où la nécessité d'un éclairage uniforme et d'une égale diffusion par transmission.

On peut évidemment obtenir un mélange quelconque : il suffit de disposer des écrans convenables sur le plan P′, *uniformément éclairé*

avec de la lumière blanche. Un miroir convenablement placé permet de comparer avec du blanc la teinte obtenue.

2° — La figure 197 *bis* montre l'appareil de Maxwell réalisé. Le spectroscope *catadioptrique* est constitué par deux prismes et un miroir concave M : on double ainsi la dispersion. La fente devant laquelle on place l'œil, est en F. Si on éclaire cette fente, le spectre réel se forme sur le plan P'.

Dans ce plan sont disposées les trois fentes qui correspondent aux couleurs fondamentales et qu'on éclaire également avec de la lumière

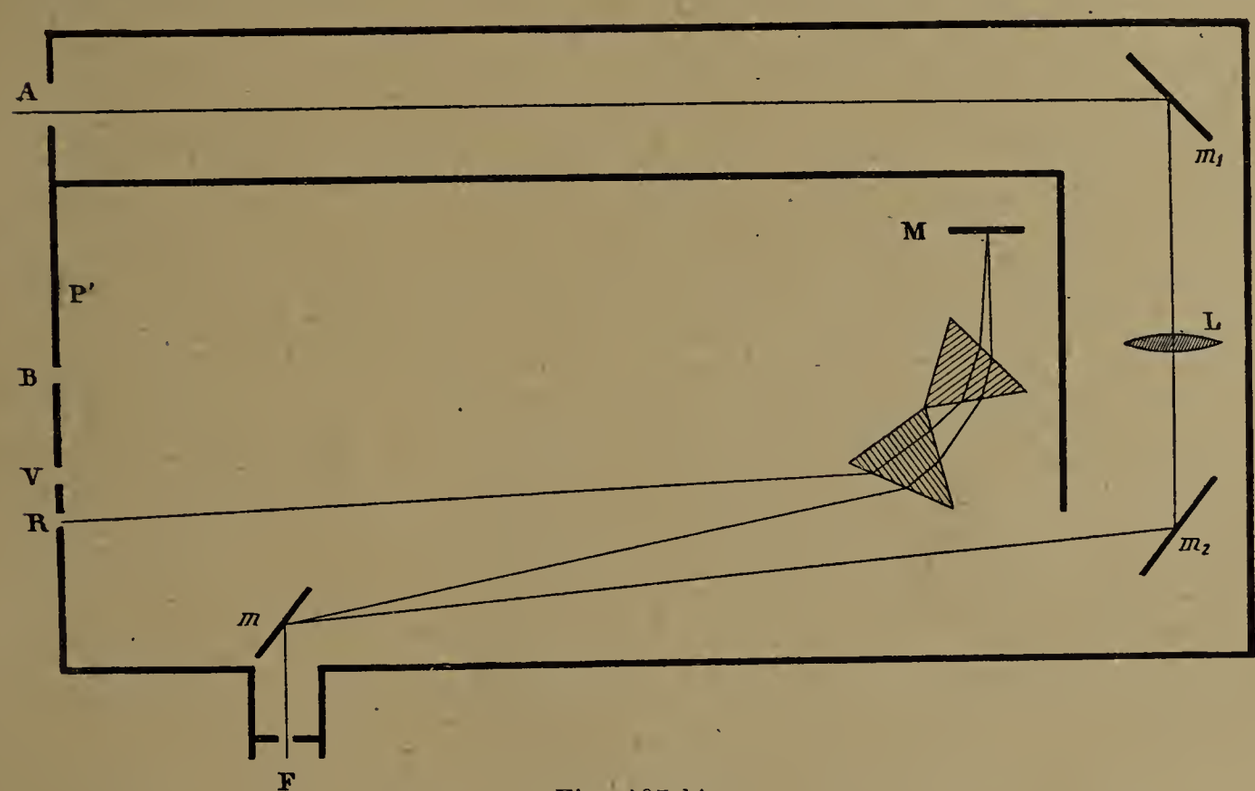


Fig. 197 *bis.*

blanche. Elles servent à envoyer dans l'œil des quantités variables et connues d'un certain rouge, d'un certain vert et d'un certain bleu.

Les miroirs M_1, M_2, et la lentille L donnent une image de la plage A éclairée par la source de comparaison.

3° — Principe sur lequel repose la méthode.

Pour unités relatives d'intensité des radiations caractérisées par les divers λ (§ 209), on prend leurs intensités dans la lumière *blanche*, lumière solaire non modifiée par notre atmosphère. Le spectre qui analyse la lumière blanche est supposé normal; mais nous savons tenir compte de la loi de dispersion des prismes (voir *Optique géométrique*, et § 121).

Ceci posé, pour additionner n radiations λ_1, λ_2, λ_3,... λ_n, ayant des intensités relatives, I_1, I_2,... I_n, on dispose dans le plan P' des fentes de largeur I_1, I_2,... I_n, dont les milieux coïncident avec les points que les radiations λ_1, λ_2,..., occupent dans le spectre RV. On s'appuie donc sur ce principe que, *les radiations voisines produisant le même effet sur l'œil, on peut modifier l'intensité d'une radiation par l'adjonction de radiations*

voisines. Ce principe est d'une application d'autant plus exacte que les fentes restent plus étroites.

En particulier dans l'appareil de Maxwell, on s'arrange de manière que les trois fentes R, V, B, aient leurs milieux là où la lumière issue de la fente F aurait ses radiations :

$$\lambda_R = 0^{\mu},630 \text{ (écarlate)} \qquad \lambda_V = 0^{\mu},528 \text{ (vert)} \qquad \lambda_B = 0^{\mu},457 \text{ (bleu)}.$$

On mesure les largeurs r, v, b, des fentes.

Entre la variable x qui repère les radiations dans le plan P′, et la longueur d'onde existe la relation $\lambda = f(x)$.

Les quantités de lumière mélangées sont alors par définition :

$$r(d\lambda : dx)_R, \qquad v(d\lambda : dx)_V, \qquad b(d\lambda : dx)_B;$$

$d\lambda : dx$ est le taux de variation de la longueur d'onde par rapport au chemin parcouru dans le spectre prismatique, taux calculé pour les radiations R, V, B.

Si le spectre est normal, les parenthèses ont la même valeur : les intensités relatives sont comme les largeurs r, v, b, des fentes.

227. — **Obtention d'une lumière de composition connue; phénomènes d'interférence et de polarisation chromatique.**

Il ne peut entrer dans mon plan d'exposer en quelques lignes tous les phénomènes d'interférence et de polarisation chromatique; ils sont étudiés dans le Cours sur *les Interférences et la Diffraction*. Je résume seulement les résultats.

1° — Échelles des teintes de Newton.

Un très grand nombre de phénomènes d'interférence (franges de Fresnel, anneaux de Newton, compensateurs de Babinet et de Bravais), *obtenus à partir de la lumière blanche*, fournissent deux séries de teintes qu'on appelle *échelles de Newton* et qui sont définies par les expressions *symboliques* (rigoureuses ou approchées suivant les cas).

$$C_1 = \int \cos^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} . d\lambda, \qquad C_2 = \int \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} . d\lambda,$$

λ est la longueur d'onde; Δ est un paramètre variable d'une teinte à l'autre.

La première expression signifie qu'on superpose les radiations qui composent la lumière blanche, après avoir multiplié l'intensité de chacune d'elles par le facteur $\cos^2(\pi\Delta : \lambda)$, où Δ est une constante.

Pour chaque valeur de Δ, on a une *teinte* particulière.

En faisant varier Δ de 0 à une certaine limite supérieure que nous allons voir, on obtient une *échelle de teintes*.

Les deux échelles sont complémentaires, c'est-à-dire donnent du blanc par leur superposition.

En effet prenons la même valeur de Δ pour les deux échelles.

On a le *blanc* (§ 209) :

$$C_1 + C_2 = \int \left(\cos^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} + \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda}\right) d\lambda = \int d\lambda.$$

C'est du reste évident d'après la manière dont on obtient *simultanément* les teintes des deux échelles et la supposition que l'énergie se conserve.

Si l'on part d'une lumière colorée, les échelles ont les expressions symboliques :

$$C_1 = \int A \cos^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} . d\lambda, \qquad C_2 = \int A \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} . d\lambda.$$

Les A représentent les intensités relatives des diverses radiations dans la lumière employée; ce sont des fonctions de la longueur d'onde.

On réalise ainsi une infinité de système de deux échelles *complémentaires par rapport à la lumière employée* :

$$C_1 + C_2 = \int A \left(\cos^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda} + \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda}\right) d\lambda = \int A d\lambda.$$

2° — Échelles obtenues a l'aide d'un quartz plan parallèle taillé perpendiculairement a l'axe.

Entre deux nicols (§ 125) dont les sections principales font l'angle α, on place un quartz taillé perpendiculairement à l'axe.

A partir de la lumière blanche, on obtient l'échelle de teintes :

$$C = \int \cos^2 \left(\alpha \pm \frac{ke}{\lambda^2}\right) . d\lambda.$$

Le signe $\pm$ correspond aux deux espèces de quartz (droit ou gauche); e est l'épaisseur de la lame; k est une constante numérique déterminée par la nature du quartz.

Chaque lame donne une échelle dont α est le paramètre.

En modifiant l'épaisseur (compensateur de Soleil), on obtient de nouvelles échelles.

Pour deux positions rectangulaires de l'un des nicols α et $\alpha \pm \pi : 2$, les teintes sont *complémentaires de la lumière employée.*

On ne modifie pas la teinte en déplaçant la lame parallèlement à elle-même (définition de l'homogénéité cristalline), ni en la faisant tourner autour d'un axe parallèle à sa normale (axe cristallographique).

On peut réaliser un grand nombre d'échelles autres que les précédentes; mais seules celles-ci ont été systématiquement utilisées.

228. Addition de deux teintes : réflexion et transmission simultanées.

1° — Une glace sans tain est disposée verticalement. L'œil voit superposés, par réflexion le carton coloré B, par transmission le carton

A. Il y a donc sur la rétine addition des lumières émises par les cartons, quelles que soient du reste les compositions de celles-ci.

L'inconvénient de la méthode est la nécessité de connaître l'angle i, pour calculer les fractions des intensités A et B reçues par l'œil.

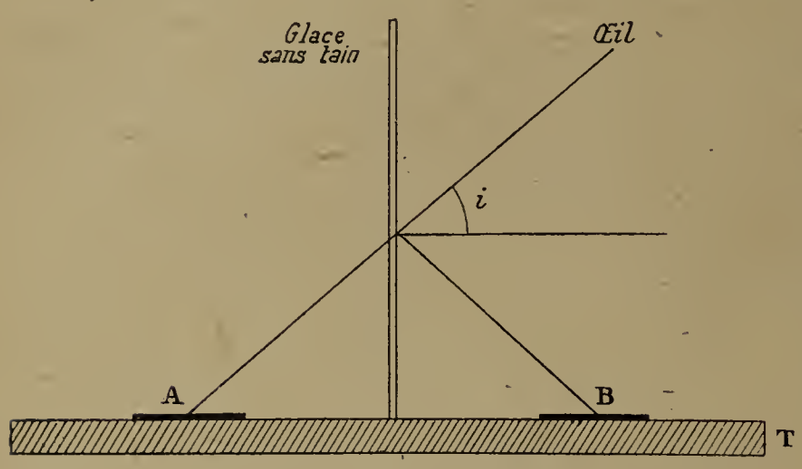


Fig. 198.

Pour i petit, la fraction transmise est grande, la fraction réfléchie est petite. Pour i voisine de 90°, la fraction transmise est petite, la fraction réfléchie est grande.

Voici comment on tient compte des réflexions multiples.

Soit h le facteur par lequel il faut multiplier l'intensité incidente pour avoir l'intensité réfléchie; en raison de la conservation de l'énergie, $1 - h$ est le facteur qui donne l'intensité transmise. Nous négli-

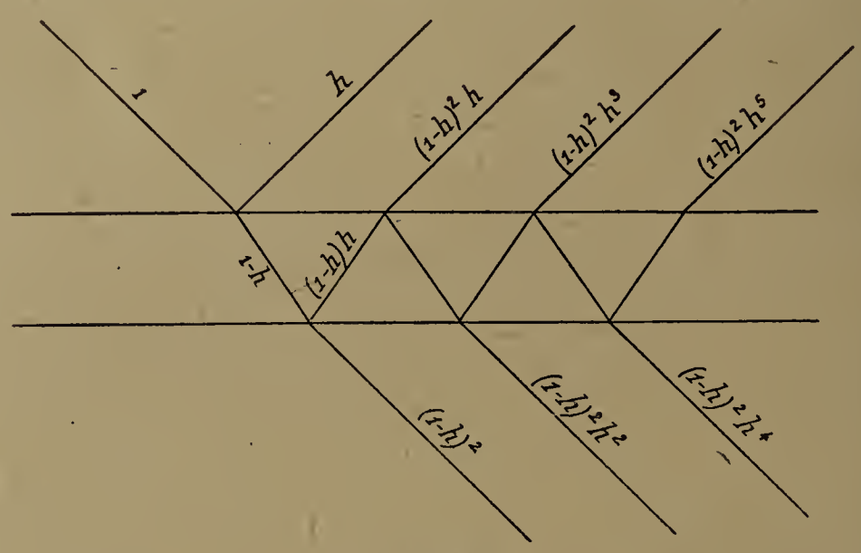


Fig. 199.

geons l'absorption. Cette quantité transmise tombe sur la seconde face. Admettons le même coefficient de réduction; le faisceau réfléchi devient $(1 - h)h$. Une partie sort dont l'intensité est $(1 - h)^2 h$.

Et ainsi de suite. Le lecteur suivra aisément sur la figure 199 les intensités des faisceaux émergents.

En définitive on a pour la quantité

réfléchie : $R = h[1 + (1 - h)^2 (1 + h^2 + h^3 + \ldots)] = \dfrac{2h}{1 + h}$;

transmise : $T = (1 - h)^2 (1 + h^2 + h^4 + \ldots) = \dfrac{1 - h}{1 + h}$.

Naturellement on retrouve $R + T = 1$.

Le coefficient h diffère suivant l'azimut de polarisation de la lumière incidente (voir notre Cours d'*Électroptique*). La lumière incidente natu-

relle peut être considérée comme la somme de deux faisceaux d'intensités égales à 0,5, polarisées respectivement dans les azimuts principaux.

Appelons h et k les facteurs relatifs à ces lumières; on a d'après la théorie de Fresnel :

$$h = \left[\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}\right]^2, \qquad k = \left[\frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)}\right]^2,$$

$$R = \frac{h}{1+h} + \frac{k}{1+k}, \qquad T = \frac{1}{2}\left(\frac{1-h}{1+h} + \frac{1-k}{1+k}\right).$$

En particulier le rapport R : T à la valeur : $\frac{R}{T} = \frac{h+k+2hk}{1-hk}$.

Connaissant l'indice de la glace et l'angle d'incidence i, on calcule l'angle r par la formule $\sin i = n \sin r$, puis les facteurs h et k, par suite le rapport R : T.

2° — Cette méthode permet de mélanger les lumières qui ont traversé

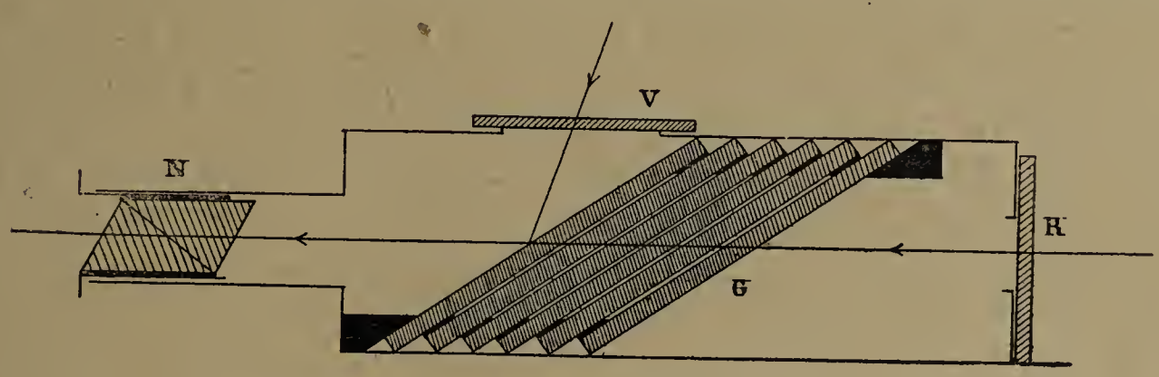


Fig. 200.

des couches liquides ou des verres colorés. On perce la table T (fig. 198) de deux ouvertures qu'on recouvre avec les verres colorés ou avec des cuves plates à fond de glace remplies des liquides colorés. On dispose des papiers blancs sous la table; on les éclaire avec des sources convenables (becs Auer par exemple).

L'appareil de Dove est beaucoup plus commode (fig. 200).

Il se compose d'une pile de glaces G, formée de six couvre objets de microscope larges, maintenus séparés par des languettes de papier. En N est un nicol. On reçoit par réflexion sur la pile la lumière qui a traversé le verre V, par transmission à travers la pile celle qui a traversé le verre R.

Ces lumières sont polarisées à angle droit.

En tournant le nicol on modifie le rapport de leurs intensités.

229. Addition de deux teintes : emploi d'un prisme biréfringent. La figure 201 montre le dispositif. Dans un carton noirci C, on découpe deux ouvertures qu'on recouvre avec des verres colorés transparents. On regarde à travers un prisme biréfringent P (voir mon

Cours sur la *Construction..... des Instruments....*) disposé à une distance et dans un azimut tels qu'une des images de A soit superposée à une des images de B. On superpose ainsi sur la rétine les lumières

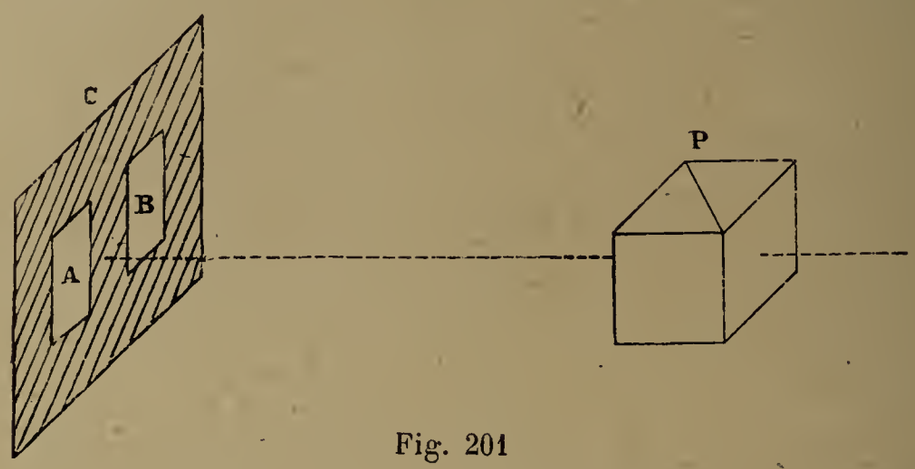


Fig. 201

séparément transmises par chaque verre, quelles que soient du reste leurs compositions.

Au § 251 nous trouverons une intéressante application de la méthode.

230. **Addition de deux teintes : Recouvrement partiel de la pupille par deux milieux transparents colorés.**

Une méthode curieuse mais peu pratique d'addition de la lumière, consiste à accoler exactement deux verres colorés. Plus aisément, on colle côte à côte sur une lame de verre deux morceaux de papiers transparents colorés.

Soient A et B les limites des verres ou des papiers. En recouvrant la pupille avec ce système, on obtient une série de teintes allant de A à B, suivant les aires de pupille recouvertes par l'un ou l'autre papier.

231. **Addition de la lumière diffusée ou transmise par une surface. Expériences de cours.**

1° — La détermination de la teinte moyenne d'un tableau (plus géné-

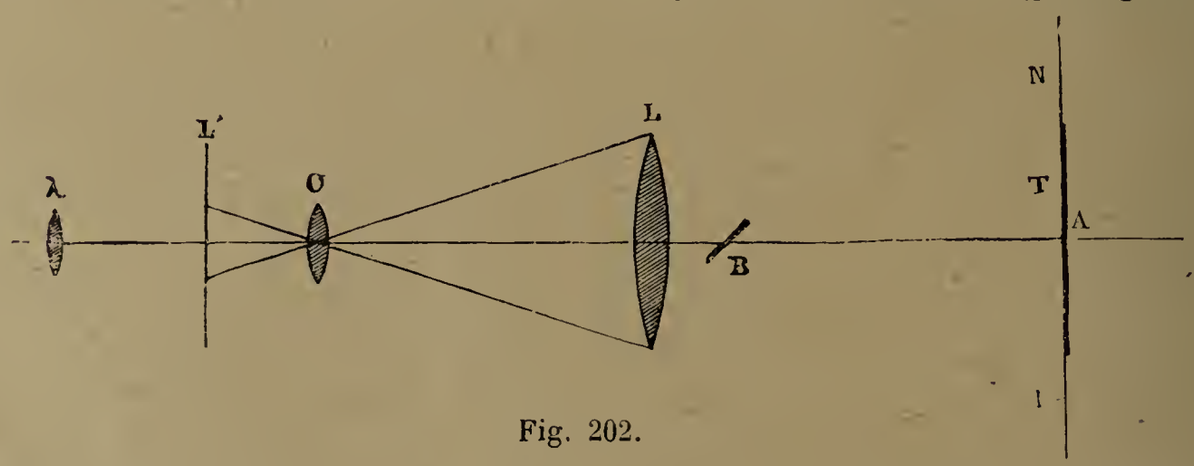


Fig. 202.

ralement de la teinte moyenne émise par une surface dans une direction moyenne déterminée) est une amusante application des propriétés de l'anneau oculaire (voir mon Cours d'*Optique Géométrique*).

L'objectif L reçoit les rayons émis par le tableau T dans la direction moyenne AB. L'oculaire O donne de l'objectif une image L′ (*anneau oculaire*) où les rayons reçus par l'objectif forment un mélange homogène. On place en L′ un verre dépoli qu'on regarde avec une loupe λ.

Pour obtenir un blanc de comparaison, un carton B blanc renvoie par diffusion la lumière qu'il reçoit d'une source latérale.

Les bords du tableau T sont entourés d'un écran noir N qui intercepte la lumière étrangère.

2° — Pour réaliser des expériences de cours par cette méthode, on prend pour surface T le système de quatre verres colorés (blanc, rouge, vert, bleu) disposés comme l'indique la figure 203 derrière des fenêtres égales; on peut les recouvrir plus ou moins par quatre volets tournants V mus par des boutons B. Derrière les verres colorés est un verre dépoli qu'on éclaire vivement avec un arc. L'appareil peut prendre la forme d'une bonnette qui s'installe sur la lanterne de projection.

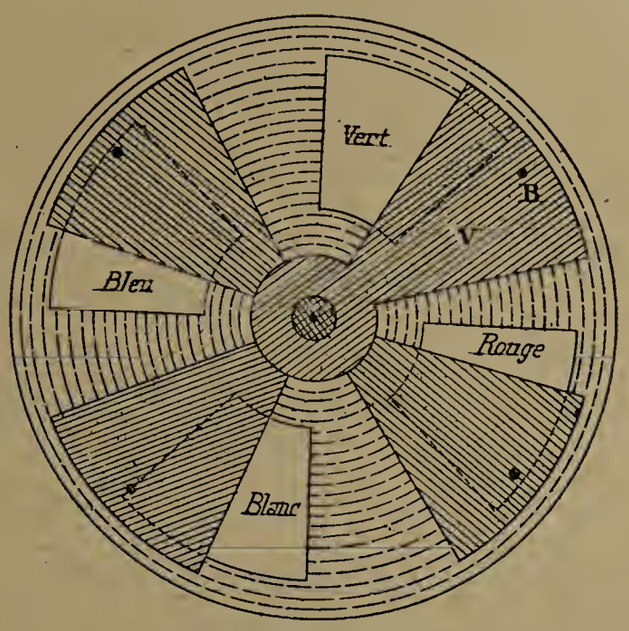


Fig. 203.

On superpose ainsi des proportions quelconques des lumières transmises par les verres colorés; on lave plus ou moins la teinte de blanc.

Le lecteur voudra bien réfléchir au rôle de la lentille L et discuter quelle doit être la position optima de la lentille O.

En particulier qu'arrive-t-il quand on supprime la lentille L?

Montrer que seule l'intensité des phénomènes est diminuée.

Étude subjective des couleurs.

232. Fonctionnement de l'œil.

1° — Le fonctionnement de l'œil diffère absolument de celui de l'oreille. L'oreille a la faculté d'analyser les sons, de les décomposer en sons simples qu'avec de l'habitude elle perçoit isolément. Les couleurs simples, caractérisées par une certaine longueur d'onde, sont *cinématiquement* comparables aux sons simples; mais l'œil ne peut pas les isoler. *Indépendamment de toute étude physiologique*, on doit admettre qu'il existe dans l'oreille des organes en nombre considérable, *de nature quelconque mais spécifiquement différents*, sortes de résonateurs pour les différents sons. Au contraire, dans l'œil le nombre des organes de perception *spécifiquement différents* est très petit; l'expérience montre qu'on peut les réduire à trois, au moins comme première approximation.

Cette opposition de fonctionnement entre l'œil et l'oreille rend vains

les rapprochements pseudoscientifiques entre la peinture et la musique. Ce qu'on a dit de sottises à cet égard est inimaginable. On a comparé les sept notes de la gamme aux sept couleurs (!) du spectre. On a pris pour argent comptant des métaphores où se retrouve le mot gamme utilisé dans les sens les plus divers.

2° — Présentons ces considérations d'une manière différente.

Quelle que soit la nature de la sensation colorée, on peut admettre au moins comme première approximation, qu'il existe un nombre fini de *sensations élémentaires indépendantes* excitées par les radiations; la sensation complexe est la *somme symbolique* des sensations élémentaires.

Soit S_1, S_2,... S_n, des quantités qui mesurent les sensations élémentaires au nombre de n; soit I les intensités des radiations λ.

L'hypothèse précédente conduit à écrire :

$$S_1 = \int f_1(I, \lambda) \, . \, d\lambda, \qquad S_2 = \int f_2(I, \lambda) \, . \, d\lambda, \qquad \ldots . \qquad (1)$$

Les intégrales représentent des *sommes* au sens habituel du mot.

Ces expressions signifient que les radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$, et dont l'intensité est I, produisent sur l'organe 1, une sensation $dS_1 = f_1(I,\lambda)\, d\lambda$.

Les formules (1) supposent que l'action d'une radiation est indépendante de l'existence simultanée de radiations de longueurs d'onde différentes.

Si nous admettons que les sensations élémentaires S_1, S_2,... S_n, sont en nombre inférieur aux causes d'excitation (radiations de longueurs d'onde diverses), une même sensation complexe, définie par un système de valeurs S_1, S_2,... S_n, correspond à une infinité de compositions différentes de la lumière reçue : *l'œil est incapable d'analyser la lumière.*

Sans qu'il soit nécessaire de spécifier le nombre n des sensations élémentaires, *nous entendons par couleur* C *un système défini de valeurs* S_1, S_2,... S_n.

L'hypothèse entraîne une conséquence vérifiée par l'expérience : *Soit* C_1, C_2,..., *des couleurs de même aspect, c'est-à-dire produisant la même impression qualitative et quantitative sur la rétine : soit* C'_1, C'_2,..., *d'autres couleurs de même aspect. Superposons sur la rétine une couleur quelconque du premier groupe à une couleur quelconque du second. Quelles que soient les couleurs choisies, nous obtenons une couleur* C *de même aspect.*

233. Preuves à l'appui des hypothèses.

Voici des faits usuels faciles à reproduire.

Certaines couleurs qui sont d'aspect identique à la lumière blanche, cessent de l'être à la lumière jaunâtre d'une bougie; d'une manière plus générale, *les couleurs d'aspect identique pour un certain éclairage peuvent cesser de l'être pour un autre éclairage.*

Par exemple, les *bleus de cuivre* sont dits *bleus lumière* parce qu'ils se modifient relativement peu quand on les éclaire avec la lumière rougeâtre d'une bougie, tandis que les bleus de cobalt et d'outremer deviennent noirs.

Les verts francs et les verts composés de jaune et de bleu, d'aspect identique à la lumière blanche, se conduisent différemment quand on les éclaire avec la lumière du sodium.

Quand on se promène dans une forêt avec des besicles à verres jaunes, le spectacle de la multiplicité des verts des feuilles est admirable. Ils sont étonnamment diversifiés par le verre jaune qui supprime les radiations communes. Même résultat quand on photographie à travers un verre jaune et avec des plaques panchromatiques (§ 277).

De ces faits qu'on multiplie aisément, résulte que *les couleurs d'aspect identique ne sont pas nécessairement de compositions identiques*; car dans ce dernier cas, multipliant respectivement par le même facteur toutes les radiations de la lumière incidente, elles conserveraient un aspect identique, quelle que soit la composition de cette lumière.

Dans la théorie précédente, il suffit pour que deux couleurs aient même aspect que les radiations qui les composent respectivement, produisent au total les mêmes actions sur les différents appareils récepteurs, quel que soit du reste le nombre de ces appareils supposé petit.

234. Blanc d'ordre supérieur; spectres cannelés.

1° — Les expériences reposent sur l'hypothèse qu'on peut remplacer une couleur par une couleur spectrale voisine sans modifier sensiblement la teinte (§ 226).

Nous comparons les intensités de radiations différentes, grâce à cette hypothèse qui permet de prendre, à partir du blanc, une quantité d'un certain rouge, par exemple, qui soit dans un rapport connu avec la quantité d'un certain vert.

L'expérience suivante est la meilleure justification de l'hypothèse.

Dans le plan P′ de l'appareil de Maxwell, disposons une grille formée de baguettes opaques séparées par des intervalles transparents. Supposons les vides égaux aux pleins. Quelle que soit l'équidistance, à la seule condition que le spectre contienne au moins une dizaine de périodes, nous obtenons du blanc; on l'appelle *blanc d'ordre supérieur*.

Il va de soi qu'analysé avec un spectroscope, ce blanc *purement subjectif* donne un spectre où manquent les radiations que nous avons supprimées : c'est un spectre *cannelé*.

2° — Nous pouvons généraliser la définition.

Soit :
$$\int \varphi(\lambda)\,d\lambda, \qquad (1)$$
l'expression symbolique d'une certaine teinte. Traitons cette lumière au moyen d'un appareil qui multiplie les intensités $\varphi(\lambda)$, par une fonction périodique quelconque de la longueur d'onde $P(\lambda)$.

La nouvelle teinte :

$$\int \varphi(\lambda) \,.\, P(\lambda) \,.\, d\lambda,$$

est identique à la teinte (1), à la seule condition qu'entre les λ qui correspondent aux extrémités du spectre visible, la fonction $P(\lambda)$ possède au moins une dizaine de périodes.

En particulier les teintes :

$$C_1 = \int \cos^2 \frac{\pi\Delta}{\lambda} \,.\, d\lambda, \qquad C_2 = \int \sin^2 \frac{\pi\Delta}{\lambda} \,.\, d\lambda,$$

sont des blancs d'ordre supérieur quand Δ est assez grand pour que, λ variant de $0^{\mu},4$ à $0^{\mu},65$, les fonctions $\cos^2$ et $\sin^2$ aient un nombre suffisant de périodes.

C'est à chaque instant que, dans l'étude des franges (voir le Cours sur *les Interférences et la Diffraction*), nous parlerons des blancs d'ordre supérieur.

235. Nombre des sensations élémentaires. Triangle des sensations.

1° — On représente les phénomènes avec une bonne approximation en limitant à *trois* le nombre des sensations élémentaires : S_1, S_2, S_3.

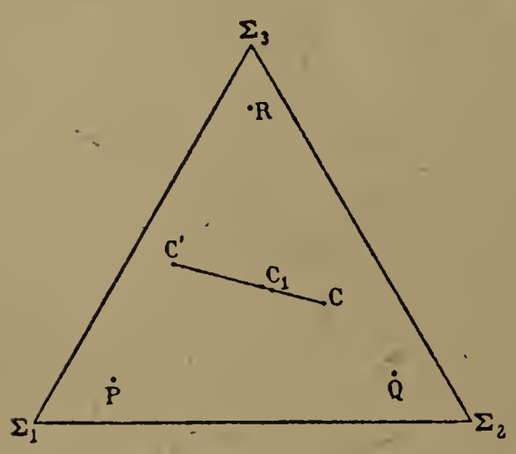


Fig. 204.

D'où une représentation symétrique plane des sensations.

Prenons trois points Σ_1, Σ_2, Σ_3, aux sommets d'un triangle équilatéral. Nous convenons de représenter une sensation complexe C, résultant de trois sensations élémentaires de grandeurs S_1, S_2, S_3, par le point obtenu en plaçant en Σ_1, la masse S_1, en Σ_2 la masse S_2, en Σ_3 la masse S_3, et en prenant le centre de gravité C de ces masses.

Nous donnons au point C la cote :

$$(S_1 + S_2 + S_3).$$

Nous représentons la couleur C par le symbole :

$$(S_1 + S_2 + S_3)\, C = S_1\Sigma_1 + S_2\Sigma_2 + S_3\Sigma_3.$$

De cette représentation résulte que toutes les couleurs observables sont à l'intérieur du triangle $\Sigma_1\, \Sigma_2\, \Sigma_3$.

Superposons deux couleurs :

$$(S_1 + S_2 + S_3)\, C, \qquad (S'_1 + S'_2 + S'_3)\, C'.$$

Nous obtenons une couleur C_1 dont le symbole est :

$$\begin{aligned}&(S_1 + S'_1 + S_2 + S'_2 + S_3 + S'_3)\, C_1 \\ &= (S_1 + S'_1)\,\Sigma_1 + (S_2 + S'_2)\,\Sigma_2 + (S_3 + S'_3)\,\Sigma_3.\end{aligned}$$

Nous ne faisons qu'exprimer que l'ordre dans lequel nous prenons les sensations est indifférent; il revient au même de mélanger les quantités $S_1 + S'_1$, $S_2, + S'_2$, $S_3 + S'_3$, des sensations fondamentales, ou d'obtenir deux couleurs C et C', que nous mélangeons ensuite; elles donnent, somme toute, les mêmes quantités de sensations élémentaires.

Ces corollaires résultent de l'hypothèse que les sensations fondamentales se superposent sans modifier réciproquement leur grandeur.

Nous pouvons admettre sans contradiction que *chaque point de triangle des sensations représente une teinte déterminée.* Cela revient à poser que si nous multiplions par le même nombre les trois nombres qui mesurent les sensations élémentaires, la sensation résultante est plus intense, mais conserve la même teinte.

Nous allons voir que cette hypothèse n'est pas en contradiction avec le phénomène de Purkinje.

2° — En vertu du § 232, nous posons :

$$S_1 = \int f_1(I, \lambda)\, d\lambda, \qquad S_2 = \int f_2(I, \lambda)\, d\lambda, \qquad S_3 = \int f_3(I, \lambda)\, d\lambda.$$

Usons de lumière blanche (lumière solaire non modifiée par notre atmosphère); par définition les intensités sont égales pour toutes les radiations. Traçons les courbes f_1, f_2, f_3, en fonction de λ: les valeurs

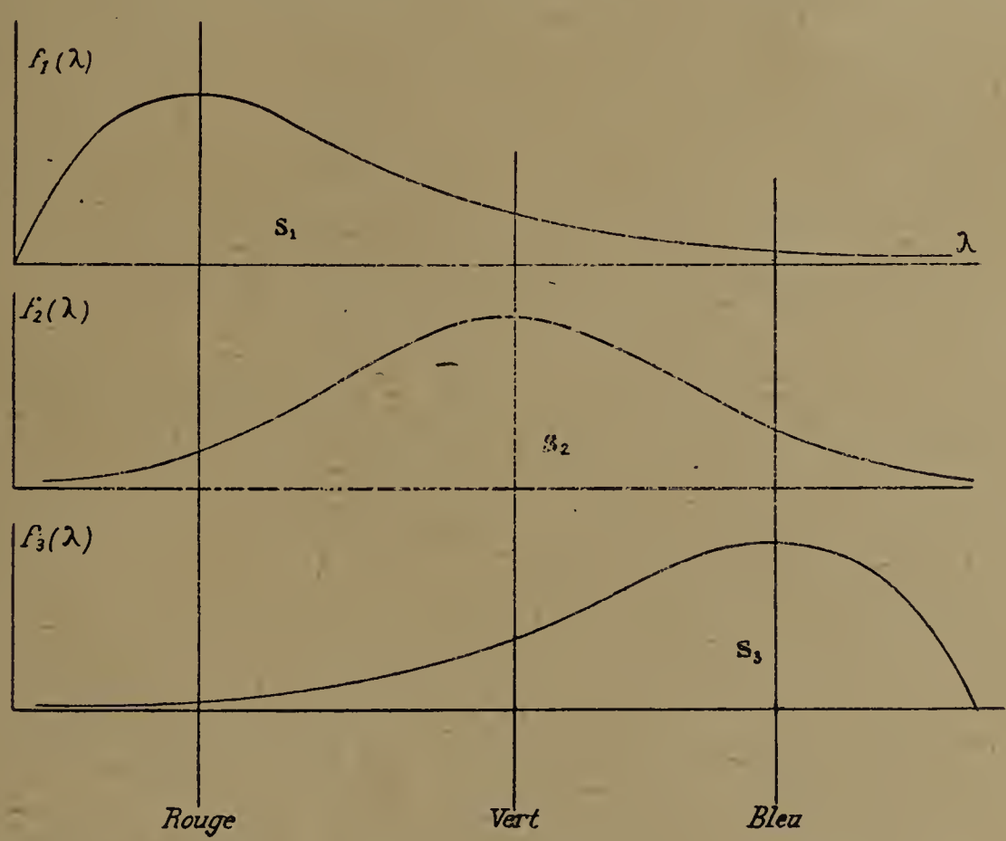


Fig. 205.

numériques des trois sensations sont représentées par les aires que ces courbes limitent.

Nous sommes conduits à donner aux courbes f l'allure que représente la figure 205. La sensation S_1 (*rouge*) est excitée au maximum par un certain rouge, et de moins en moins à mesure qu'on s'écarte de ce

rouge. La sensation S_2 (*verte*) est excitée au maximum par un certain vert, et de moins en moins par les couleurs plus ou moins infrangibles. De même pour la sensation S_3 (*bleue*).

Changeons l'intensité de la lumière blanche utilisée.

La très grande complication du phénomène vient de ce que nous ne pouvons pas poser : $f(I, \lambda) = If(\lambda)$.

Autrement dit, en raison du phénomène de Purkinje, quand on modifie l'intensité de la lumière blanche utilisée, les ordonnées des trois courbes ne sont pas allongées ou raccourcies dans le même rapport.

3° — Quoi qu'il en soit, supposons connues les fonctions $f_1(I,\lambda)$, $f_2(I,\lambda)$, $f_3(I,\lambda)$. Quels que soient la complexité et le nombre des lumières à composer, nous pouvons calculer les intégrales S_1, S_2, S_3. Appliquant alors la construction du *1°*, nous déterminons un point du triangle des sensations, par suite nous connaissons la teinte résultante et son éclat.

236. Couleurs principales. Théorie d'Young.

1° — Malheureusement nous ne connaissons pas les fonctions f; nous n'avons qu'une idée vague des sensations fondamentales.

La théorie est encore dans les nuages; voyons à l'en faire sortir.

La théorie classique d'Young-Maxwell néglige le phénomène de Purkinje et pose :

$$f(I, \lambda) = If(\lambda).$$

Cela revient à écrire qu'une lumière de composition déterminée (dont les radiations composantes ont des intensités *relatives* déterminées) correspond à un point déterminé du triangle des sensations, quelles que soient les intensités *absolues* des radiations.

En effet multiplier toutes les intensités par le même nombre, c'est multiplier par ce nombre les trois intégrales :

$$S = \int If(\lambda) \, . \, d\lambda.$$

On ne change donc pas la position du centre de gravité des sensations.

2° — Ceci posé, prenons trois lumières *de compositions déterminées*. Bien que ce ne soit pas nécessaire et uniquement pour être sûr de les retrouver semblables à elles-mêmes, choisissons trois lumières *simples*. Des raisons que nous verrons, ont conduit à prendre les suivantes :

$$P = 0^{\mu},630 \text{ (écarlate)} \qquad Q = 0^{\mu},528 \text{ (vert)} \qquad R = 0^{\mu},457 \text{ (bleu)}.$$

Je les appelle P, Q, R, pour conserver les notations de Maxwell.

Dès lors que nous négligeons le phènomène de Purkinje, elles occupent dans le triangle des sensations (fig. 204) trois points bien déterminés P, Q, R.

3° — Il résulte des hypothèses fondamentales qu'en mélangeant ces trois couleurs en proportions convenables, nous réalisons toutes les

sensations complexes (c'est-à-dire toutes les teintes) qui se trouvent à l'intérieur du triangle PQR.

Nous ne pouvons réaliser que celles-là.

On appelle *couleurs principales* les trois couleurs simples qui par leur superposition sur la rétine permettent d'obtenir le plus grand nombre de sensations, par conséquent celles pour lesquelles le triangle PQR se rapproche le plus du triangle inconnu $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$. Naturellement le

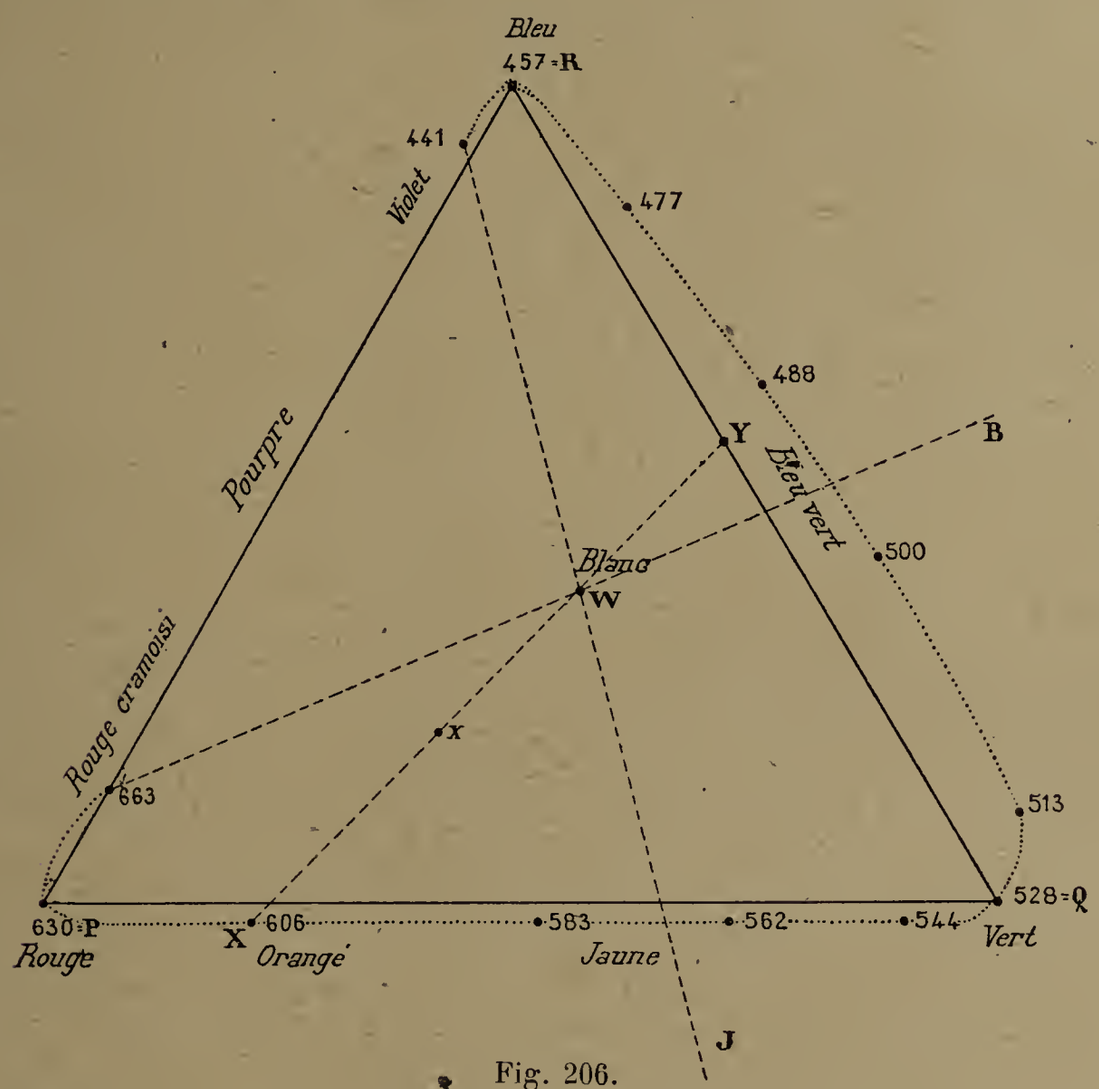


Fig. 206.

choix de ces couleurs prête à discussion; nous nous arrêterons à celui de Maxwell. Mais il importe d'observer que la vérification de la théorie d'Young est indépendante du choix des couleurs principales, puisqu'en définitive elle se borne à dire que les phénomènes subjectifs sont fonctions de trois variables. Changer de couleurs, c'est changer de variables; ce qui modifie la représentation, mais ne modifie que cela.

Comme pour l'instant nous ne savons rien des sensations élémentaires, comme le triangle $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ peut sans inconvénient être quelconque, nous prendrons pour point de départ de notre étude expérimentale les couleurs principales P, Q, R, de Maxwell que nous placerons aux sommets d'un triangle équilatéral, *le triangle des couleurs* (fig. 206).

Ce n'est qu'après coup que nous chercherons à situer dans le plan PQR les sensations fondamentales, c'est-à-dire les points Σ_1, Σ_2, Σ_3.

On n'oubliera pas que toutes les sensations colorées ne sont pas à l'intérieur du triangle PQR.

237. Position des couleurs simples et du blanc par rapport au triangle des couleurs.

Pour des raisons que nous verrons plus loin, une grande précision est inutile parce que les phénomènes sont variables d'un œil à l'autre : il ne faut pas que de nombreuses décimales fassent illusion. A supposer qu'elles soient exactes pour un œil déterminé (encore est-ce difficile à admettre en vertu du phénomène de Purkinje), elles ne le seraient plus pour un autre.

1° — Blanc.

Déterminons dans le plan PQR la position du blanc W (*white* en anglais).

On trouve l'équation :

$$W = 50\,P + 80\,Q + 80\,R. \qquad (1)$$

Cela signifie que si l'on part de la lumière blanche définie comme au § 121, étalée en un spectre normal, on obtiendra du blanc en superposant les lumières issues de trois fentes de largeurs :

50	dont le centre coïncide avec		$\lambda = 0^{\mu},630$ (rouge, P),
80	—	—	$\lambda = 0^{\mu},528$ (vert, Q),
80	—	—	$\lambda = 0^{\mu},457$ (bleu, R).

Le point P est donc à peu près sur la bissectrice de l'angle QPR et notablement plus rapproché de la droite QR que du point P.

Si le spectre est prismatique, la distance x d'une radiation de longueur d'onde λ à un point du plan P′ (fig. 197) pris pour origine, ne varie pas proportionnellement à λ.

On étudiera donc la loi de dispersion $x = f(\lambda)$.

Pour avoir du blanc, il faut donner aux trois fentes des largeurs relatives p, q, r, telles qu'on ait en moyenne :

$$\frac{p}{50}\left(\frac{d\lambda}{dx}\right)_P = \frac{q}{80}\left(\frac{d\lambda}{dx}\right)_Q = \frac{r}{80}\left(\frac{d\lambda}{dx}\right)_R.$$

Cette équation exprime que la fente doit être d'autant plus étroite que le spectre prismatique est plus tassé là où elle se trouve.

En particulier la largeur de la fente rouge sera moindre que les 5 : 8 de la largeur de la fente bleue.

Je répète que les résultats varient notablement avec l'observateur; il serait vain de croire à l'existence d'une équation *étalon* pour le blanc déterminée avec un grand nombre de décimales.

Facteur d'intensité du blanc.

A la place de trois fentes de largeurs, 50, 80, 80, prenons trois fentes

de largeurs 25, 40, 40 : nous obtiendrons un blanc deux fois moins intense. Nous voyons donc la nécessité de fixer par un facteur l'intensité du premier blanc obtenu.

Nous posons qu'il est égal à $50 + 80 + 80 = 210$, et nous écrivons :

$$50\,P + 80\,Q + 80\,R = 210\,W.$$

Nous conserverons par la suite ce même blanc de comparaison.

Nous allons voir qu'il nous permet d'attribuer à chaque couleur un *facteur d'intensité.*

2° — Couleurs simples.

Cherchons à situer dans le plan PQR une couleur X qui sera, par exemple, l'orangé $\lambda = 0^{\mu},606$.

L'expérience montre d'abord qu'avec des proportions convenables du rouge P et du vert Q, on réalise un orangé *mais moins saturé que l'orangé spectral.*

Cette première expérience fixe la position d'un point voisin de celui que nous cherchons, plus exactement elle fixe la position du point où la droite WX coupe la droite PQ.

Pour aller plus loin remarquons qu'avec un mélange convenable des trois couleurs R, Q, X, nous pouvons obtenir du blanc.

Avec le mélange des couleurs R et Q, nous réalisons par tâtonnement une teinte Y telle que la droite XY passe par le point W.

D'où une série d'équations, contenant toujours deux couleurs fondamentales, qui pour les couleurs simples entre P et Q sont de la forme :

$$xX + qQ + rR = W, \qquad (2)$$

et pour les couleurs simples comprises entre R et Q sont de la forme :

$$xX + qQ + pP = W. \qquad (3)$$

Les nombres q et r de l'équation (2) fixent la position du point Y ; les nombres $(r + q)$ et x fixent alors la position du point X, puisque par hypothèse celle du point W est connue.

3° — Facteur d'intensité de la couleur X.

Nous avons obtenu au moyen des couleurs Q, R, X, non seulement du blanc, mais le blanc qui nous sert d'unité provisoire et auquel la première expérience nous conduit à donner la valeur 210 (pour préciser). L'équation (2) s'écrit donc :

$$xX + qQ + rR = 210\ W.$$

Or d'après notre système de représentation, nous devons avoir :

$$x + q + r = 210,$$

ce qui n'est généralement pas vérifié. Nous écrivons donc :

$$x\xi X + qR + rR = 210\ W,$$

avec la condition $\qquad x + q + r = 210\,;$

le facteur ξ ainsi déterminé est le *facteur d'intensité* de la radiation X.

C'est le coefficient par lequel il faut multiplier la largeur de la fente par laquelle est admise la couleur spectrale étudiée, pour obtenir la luminosité réelle de cette radiation.

238. **Résultat des expériences.**

Nous sommes maintenant en état de comprendre les tableaux résumant les expériences de Maxwell et de L. Rayleigh.

Représentons par 1 000 les intensités des trois radiations fondamentales. Rappelons ce que cela signifie. On part de la lumière blanche étalée en *un spectre normal*; on dispose trois fentes de même largeur (un millimètre par exemple) dont les centres correspondent aux radiations P, Q, R : par convention, les lumières ainsi obtenues sont d'une même intensité que nous représentons par 1 000.

Plaçons le centre d'une fente d'un millimètre sur la radiation $0^{\mu},606$, par exemple.

L'équation donnée par L. Rayleigh est :

$$1\,155\,P + 360\,Q - 6\,R.$$

Cela veut dire qu'on obtient le point figuratif de la radiation considérée en plaçant le poids 1 155 en P, 360 en Q et le poids fictif — 6 en R. On obtient ainsi une intensité :

$$1\,155 + 360 - 6 = 1\,509.$$

Autrement dit, la luminosité de la lumière orangée que laisse passer la fente d'un millimètre, est une fois et demie environ celle des couleurs fondamentales. Dans les mélanges où intervient la radiation $0^{\mu},606$, elle vaut donc 1,5 fois ce qu'on déduirait de la largeur de la fente qui la laisse passer.

En définitive l'unité d'intensité d'une couleur quelconque X, quantité que laisse passer une fente d'un millimètre placée sur un spectre normal, équivaut à trois poids fictifs placés en P, Q, R, *poids dont la somme n'est pas nécessairement égale à 1 000.*

Nous verrons plus loin l'importance de ces remarques. Au reste le lecteur comprendra mieux le rôle des facteurs d'intensité après la lecture du § 246 où les mêmes notions se présentent d'une manière plus concrète.

239. **Rouges écarlates, pourpres, violets.**

Le lecteur continuera ses expériences au moyen des disques rouge (vermillon) et bleu (de cobalt).

Conformément à la table de Maxwell, il vérifiera qu'en associant au vermillon des quantités croissantes de bleu, on obtient d'abord les rouges *écarlates* ou *cramoisis* qui correspondent à l'extrémité rouge du spectre visible, puis la gamme extrêmement variée des *pourpres.*

En forçant toujours le bleu, on arrive aux *violets* et aux *indigos.*

D'où la réponse à la question vulgaire : *existe-t-il d'autres sensations*

que celles éprouvées en regardant un spectre pur plus ou moins lavé de blanc? Il en existe une infinité qui correspondent à la partie moyenne de la région PWR du plan : elles peuvent être considérées comme des mélanges des couleurs simples P et R plus ou moins lavées de blanc : ce sont les *pourpres*.

Toute la série des *roses* fait partie de ce groupe.

En peinture les couleurs qui se trouvent sur la droite PR s'obtiennent généralement par des mélanges de rouge et de bleu. Mais on les réalise aussi avec des couleurs franches (le pourpre antique, les laques de cochenille et de garance, les violets de Mars et de cobalt, une infinité de couleurs d'aniline aussi séduisantes que peu solides).

240. Saturation. Couleurs complémentaires.

1° — Joignons le blanc W à une couleur simple quelconque X (fig. 206). Quand le point figuratif passe de W à X, on part du blanc pur pour aboutir à une radiation simple. Les couleurs intermédiaires sont caractérisées par le même *ton* plus ou moins dilué.

Aucune couleur simple *saturée* ne s'obtient par le mélange d'une ou plusieurs autres, l'expérience montrant que la courbe sur laquelle se disposent les couleurs simples, est convexe. L'addition de deux couleurs simples donne toujours une couleur plus ou moins lavée de blanc. Elle l'est d'autant plus que le point figuratif du résultat de l'addition est plus voisin du point W. Comme cas particulier, il arrive que la saturation de la couleur résultante soit nulle : les radiations simples sont *complémentaires*.

2° — Couleurs complémentaires.

On appelle *complémentaires* deux couleurs simples ou complexes qui, prises en quantités convenables et superposées sur la rétine, donnent la *sensation de blanc*.

Deux couleurs qui par leur addition donnent du *blanc objectif*, sont naturellement complémentaires; mais cette condition, évidemment suffisante, n'est pas nécessaire.

Quoi qu'en disent certains auteurs qui cherchent des difficultés pour avoir l'air de les résoudre, les physiciens ont toujours pris la définition des couleurs complémentaires dans le même sens. Il est clair qu'en disant que le jaune verdâtre est complémentaire du violet, Helmholtz ne prétend pas dire que l'addition du jaune verdâtre et du violet donne du *blanc objectif*.

Les points figuratifs de deux lumières complexes qui par leur addition en quantités convenables donnent du blanc, sont respectivement sur une droite passant par le point W, de part et d'autre de ce point.

En particulier on obtient du blanc par l'addition dans un rapport convenable de deux radiations simples qui ne sont pas comprises dans l'ângle BWJ, c'est-à-dire dont les longueurs d'onde sont extérieures à l'intervalle $\lambda = 0^{\mu},570$ et $\lambda = 0^{\mu},492$. Les radiations dont les longueurs

d'onde sont comprises dans cet intervalle, ont pour complémentaires des *pourpres* résultant par exemple de l'addition du rouge P et du bleu R.

3° — Portons en abscisses le λ d'une couleur simple et en ordonnées le λ de la complémentaire. Nous obtenons deux arcs hyperboliques, symétriques par rapport à la bissectrice des axes. Quand on avance de R en B sur l'axe des abscisses, le λ de la couleur complémentaire change d'abord avec une extrême lenteur, puis avec une extrême rapidité.

Ce fait est d'accord avec cet autre qu'aux extrémités du spectre, le

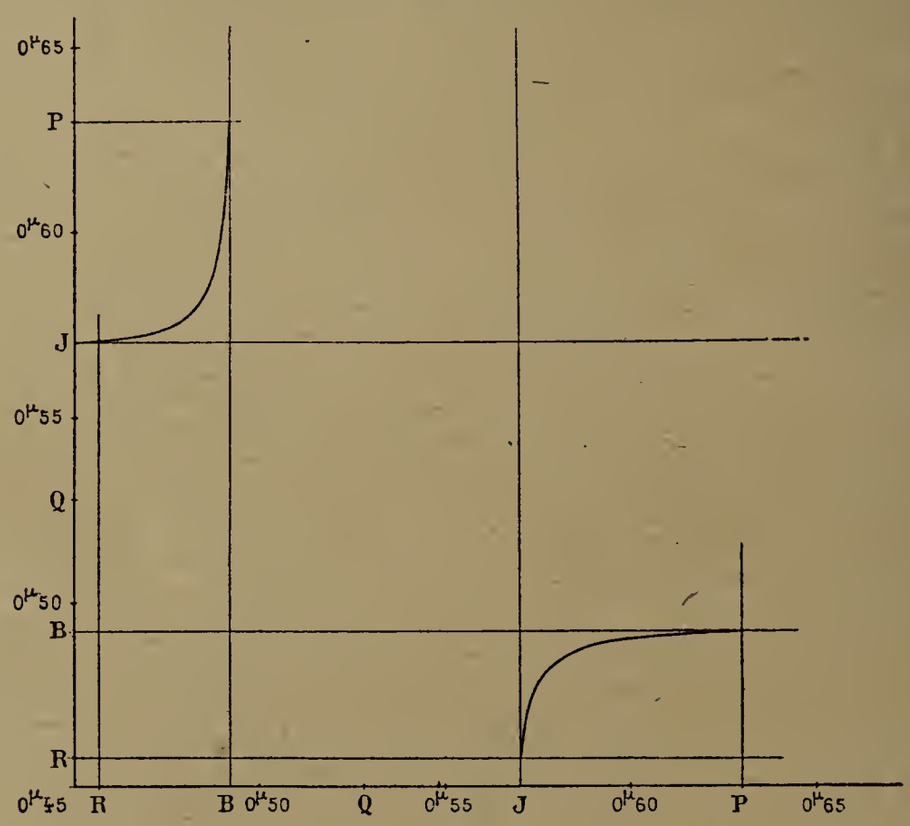


Fig. 207.

ton des couleurs varie très lentement par rapport à la longueur d'onde, tandis qu'au milieu il varie très rapidement.

4° — Les phénomènes de polarisation chromatique fournissent commodément une infinité de teintes *complémentaires*.

La figure 208 montre le dispositif.

On emploie comme polariseur un *verre à vitre* M_1 ; il réfléchit la lumière sous l'angle i qui satisfait à l'équation $tg\,i = n$.

Cet angle vaut 57° environ pour $n = 1{,}53$.

Par commodité il est bon d'utiliser un second miroir M_2 qui peut sans inconvénient être métallique et qui renvoie la lumière des nuages par exemple.

En L est une lame cristalline, plan parallèle mince.

On l'obtient en clivant des lames de mica ou des lames de gypse; l'acide tartrique, le sucre en gros cristaux, l'azotate de potassium,.... donnent aussi des plages régulières d'aires suffisantes.

Le prisme biréfringent P est constitué par un petit prisme de spath *s*, obtenu par clivage, auquel on accole deux prismes de verre V.

L'œil est en O ; il accommode sur la lame cristalline.

A chaque épaisseur de chaque cristal correspondent deux teintes complémentaires et deux seulement. On en modifie la saturation en changeant l'azimut du prisme P relativement au plan de réflexion du miroir M_1 (voir pour la théorie le Cours sur *les Interférences et la Diffraction*).

On obtient une gamme plus riche en utilisant des lames de quartz taillées perpendiculairement à l'axe ; dans ce cas on modifie les teintes complémentaires par la rotation du prisme (voir plus loin, § 251).

Que les teintes sont complémentaires de la lumière utilisée, du blanc en particulier, résulte de ce que le prisme biréfringent ne détruit pas la lumière, mais la divise en deux faisceaux : ce qui n'est pas dans l'un se retrouve dans l'autre.

Si le trou T est assez large, les images dues au prisme restent en partie superposées. On vérifie que dans cette région la lumière transmise est blanche, plus généralement qu'elle a la teinte de la lumière incidente.

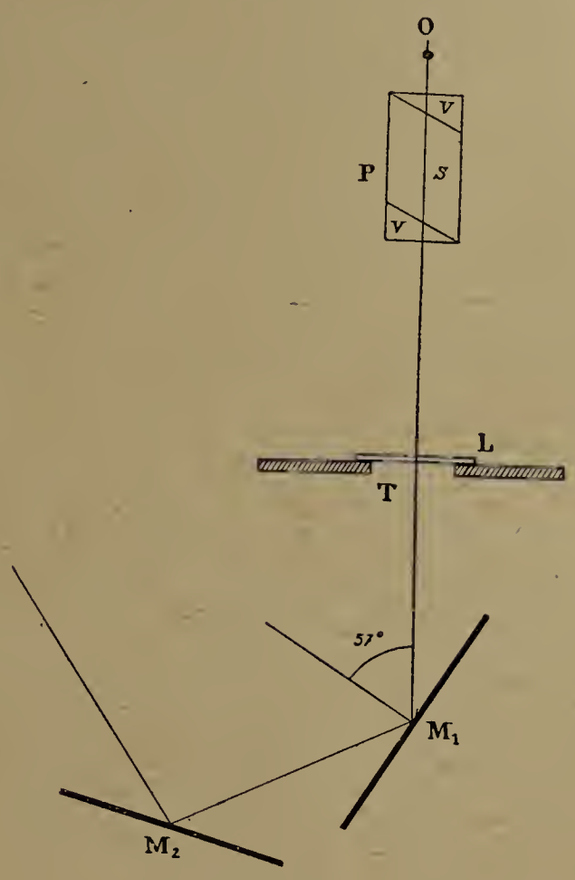


Fig. 208.

241. Remarques de von Bezold.

1° — Maxwell prend pour couleurs fondamentales trois radiations de longueurs d'onde :

	$0^{\mu},630$	$0^{\mu},528$	$0^{\mu},457$
dont les inverses sont			
	1587	1894	2188
Différences	307	294	

En vertu de la formule $\lambda = VT$, les inverses des longueurs d'onde sont proportionnels aux fréquences des vibrations. Le calcul précédent montre donc qu'il suffirait de changer à peine la longueur d'onde du vert pris pour fondamental (de prendre $0^{\mu},530$) pour que les différences des fréquences soient les mêmes.

Ceci posé, *distribuons les couleurs simples sur deux côtés d'un triangle équilatéral, de manière que les distances comptées sur ces côtés soient proportionnelles aux différences des fréquences.*

Nous trouvons une distribution qui diffère peu de celle que fournissent les expériences de Maxwell. Pour donner aux inverses une signification précise, multiplions-les par trois.

Nous aurons (en trillions par seconde 10^{12}) les fréquences :

rouge 476 vert 566 bleu 656

dont l'équidistance est 90.

Déterminons la position du point blanc W, d'après les expériences de Maxwell, en prenant les complémentaires des couleurs fondamentales.

La complémentaire du rouge $0^{\mu},630$ est $0^{\mu},495$ dont la fréquence est 606.
La complémentaire du bleu $0^{\mu},457$ est $0^{\mu},570$ — 526.

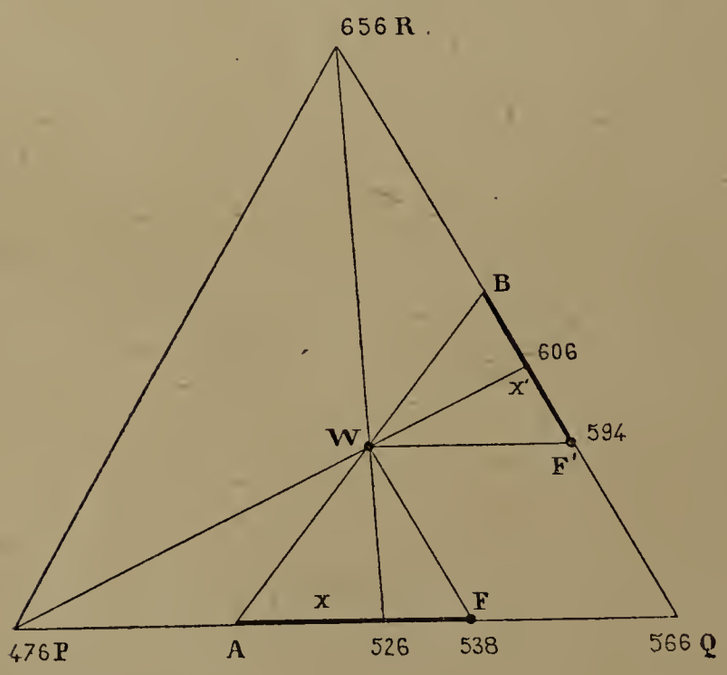


Fig. 209.

2° — Tout ceci posé, voici la remarque intéressante de von Bezold. Les couleurs complémentaires A et B se trouvent sur une droite passant par le point W. Or un théorème classique (Exercices de Mathématiques, § 350) apprend que les points ainsi déterminés forment deux divisions homographiques dont le sommet Q est un point double.

Les foyers F et F′ de ces divisions s'obtiennent en menant par W des parallèles aux côtés PQ et RQ.

Enfin les distances x, x', des points conjugués aux foyers correspondants satisfont à l'équation :

$$xx' = \text{constante}. \qquad (1)$$

Soit n et n' les fréquences des radiations A et B ; soit N et N′ les fréquences qui correspondent aux foyers. L'équation (1) devient :

$$(N - n)(n' - N') = \text{constante}.$$

Pour déterminer la constante, appliquons l'équation au point Q qui est double. L'équation devient :

$$(538 - n)(n' - 594) = \overline{28}^2 = 784.$$

Si donc nous portons en abscisses et en ordonnées les fréquences n et n' des couleurs complémentaires, nous obtenons un arc d'hyperbole : ce que l'expérience vérifie.

242. Calcul de la teinte d'une lumière de composition donnée.

1° — Soit :

$$\int f(\lambda) \, . \, d\lambda,$$

l'expression symbolique de la teinte.

Pour savoir à quelle couleur elle correspond, il s'agit de calculer quels poids fictifs totaux on doit placer aux points P, Q, R, du plan des couleurs.

On rend les calculs possibles en remplaçant l'intégrale par une somme. On considère, par exemple, 20 radiations dont les longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2 \ldots, \lambda_{20}$ sont en progression arithmétique et occupent tout le spectre visible. L'unité d'intensité de la radiation j équivaut à trois poids fictifs P_j, Q_j, R_j, placés aux points P, Q, R (§ 238).

Les poids fictifs dont il faut chercher les centres de gravité, sont donc :

$$\sum_1^{20} f(\lambda_j) P_j \qquad \sum_1^{20} f(\lambda_j) Q_j \qquad \sum_1^{20} f(\lambda_j) R_j . \tag{1}$$

Nous supposons qu'on utilise un spectre normal. La table des couleurs pourrait être construite à partir d'un spectre prismatique, l'unité conventionnelle pour chaque radiation étant encore l'unité de largeur de la fente dont le centre coïncide avec la place de cette radiation dans le spectre. On trouverait alors pour les radiations λ_j autres que les fondamentales des nombres P_j, Q_j, R_j, différents des premiers.

Les poids fictifs totaux conservent la forme (1).

Pour remplacer l'intégrale par une somme, il faut que les λ soient encore choisis équidistants sur le spectre prismatique utilisé.

2° — Echelles de Newton.

On a appliqué la méthode précédente aux échelles de Newton (§ 227) pour lesquels la fonction $f(\lambda)$ a l'une des formes :

$$\cos^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda}, \qquad \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda}. \tag{2}$$

On se donne la valeur Δ, on calcule les valeurs de $f(\lambda)$ pour les radiations λ_j et l'on effectue les sommes (1).

Recommençant pour une série de valeurs de Δ, on obtient des courbes qui naturellement partent du blanc pour $\Delta = 0$, et reviennent au blanc (blanc d'ordre supérieur, § 234) pour Δ grand.

La quasi-identité des teintes calculées et des teintes observées est certes une preuve en faveur de la théorie, mais une preuve dont il serait mauvais d'exagérer l'importance.

Ce n'est pas avec des calculs aussi compliqués qu'on vérifie une théorie quantitativement aussi flottante (les résultats numériques varient d'un expérimentateur à l'autre, et probablement pour le même observateur avec son état physiologique actuel) et une théorie qu'en définitive le phénomène de Purkinje rend peu rigoureuse. D'autre part l'intérêt pratique du calcul des teintes est nul aujourd'hui, puisque personne ne doute de l'exactitude des coefficients (2).

On comprend que Fresnel ait cherché à soutenir sa théorie de la *polarisation chromatique* par le calcul des teintes; mais ce qui paraissait nécessaire il y a cent ans est inutile aujourd'hui.

Ceux qu'intéressent les courbes dont je parle ci-dessus, les trouveront dans les œuvres de L. Rayleigh (1886).

3° — Calculs de Lommel.

Si les calculs précédents sont corrects et d'un intérêt à tout prendre encore grand, je n'en dirai pas autant des essais de Lommel, pour ne citer qu'un exemple. Je déteste l'algèbre inutile et les calculs qui, basés sur des principes absurdes, conduisent à des résultats dont tout le monde se passerait aisément.

Lommel trouve longs les calculs précédents : il veut les remplacer par une intégrale, sans s'occuper de savoir s'il ne substitue pas des calculs idiots à des calculs sensés. La question du temps ne doit pas intervenir quand il s'agit de calculs à effectuer une fois pour toutes et que l'on peut confier à un calculateur de métier armé d'une machine à calculer.

Quoi qu'il en soit, Lommel substitue un cercle à la courbe expérimentale sur laquelle se trouve les radiations simples (courbe pointillée de la figure 206). Empruntant et faussant l'idée de von Bezold, il distribue les couleurs sur le cercle de manière que les distances angulaires $\varphi - \varphi_0$ y soient proportionnelles aux fréquences (§ 241). Cela revient à poser :

$$n = \frac{1}{\lambda} = a + \frac{b}{2\pi}\varphi. \qquad (3)$$

Pour déterminer les constantes de sa formule, il écrit que les couleurs $\lambda_1 = 0^{\mu},656$, $\lambda_2 = 0^{\mu},492$, trouvées complémentaires par Helmholtz, sont aux extrémités d'un diamètre. Comme on est maître de placer à l'origine $\varphi = 0$, une couleur quelconque, les constantes de la formule (3) sont complètement déterminées. Peu importe les valeurs trouvées.

Lommel aurait pu s'arrêter là; en effet, loin de laisser une place pour les pourpres, le spectre visible ainsi défini occupe $360 + 69$ degrés; les violets extrêmes se superposent aux rouges extrêmes.

Lommel ne s'embarrasse pas pour si peu.

Soit :
$$f(n) = f\left(a + \frac{b}{2\pi}\varphi\right),$$

le facteur de réduction à appliquer à chaque radiation en raison du phénomène étudié. Par exemple, pour une des échelles de Newton, on a :

$$f(n) = \cos^2 \frac{\pi\Delta}{\lambda} = \cos^2 \pi\Delta\left(a + \frac{b}{2\pi}\varphi\right).$$

Lommel calcule la position du centre de gravité par les formule ordinaires, en intégrant entre les limites 0 et 2π.

Il trouve naturellement pour la masse fictive et pour les coordonnées :

$$M = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(n)\, d\varphi,$$

$$Mx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(n) \,.\, \cos\varphi \,.\, d\varphi, \qquad My = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(n) \,.\, \sin\varphi \,.\, d\varphi.$$

D'où x et y; d'où la teinte résultante.

Ces calculs n'ont aucun sens et ne méritent pas d'être discutés.

Naturellement les résultats calculés et observés diffèrent beaucoup.

Quand les physiciens comprendront-ils que certains travaux sont stupides dans leur principe même et quels qu'en soient les résultats?

Faut-il ajouter que M. Bouty trouve important le mémoire de Lommel et l'analyse longuement dans le *Journal de Physique*? On serait bien étonné que ce pauvre homme, champion ministériel de la Science Française, ne trouvât pas merveilleuse une sottise!

243. Phénomène de Purkinje.

Le phénomène de Purkinje (§ 127) complique singulièrement la *théorie des couleurs*. Il en résulte que, dans le plan des sensations $\Sigma_1\ \Sigma_2\ \Sigma_3$, le point représentatif d'une lumière de composition *relative* bien déterminée se déplace quand on modifie son intensité absolue. En effet sa teinte varie au point de changer de nom, tandis que d'après nos hypothèses, qui sont les plus simples, à chaque point du plan des sensations correspond une teinte bien déterminée.

Les points figuratifs des couleurs P, Q, R, choisies comme fondamentales se déplacent donc dans le plan $\Sigma_1\ \Sigma_2\ \Sigma_3$ quand suivent les intensités abolues des radiations P, Q, R. Comme nous n'avons aucun procédé expérimental pour mesurer ces déplacements, nous sommes conduits à laisser fixes les points P, Q R; mais alors chaque point du plan P Q R ne représente plus une teinte d'aspect bien déterminé.

En particulier, suivant l'intensité absolue, au point P sont superposés tous les tons qui vont du vermillon au rouge chocolat; au point J sont superposés tous les tons qui vont du jaune au vert (§ 214), etc...

En définitive la théorie se borne à dire qu'il y a trois sensations indépendantes S_1, S_2, S_3, reliées aux excitations par les formules :

$$S_1 = \int f_1(I, \lambda) \,.\, d\lambda, \qquad S_2 = \int f_2(I, \lambda) \,.\, d\lambda, \qquad S_3 = \int f_3(I, \lambda) \,.\, d\lambda;$$

La sensation est complètement déterminée par les rapports $S_1 : S_2 : S_3$. Mais nous ne connaissons que l'allure des fonctions f_1, f_2, f_3; ce qui suffit du reste à relier un grand nombre de phénomènes.

Après le § 224, est-il besoin d'expliquer au lecteur que ni Young, ni Maxwell, ni Helmholtz, ni personne d'intelligent n'a jamais cherché à réaliser matériellement une table des couleurs?

244. Définition imprécise du blanc subjectif.

Le *blanc objectif* est la lumière que nous envoie le soleil. Pour des raisons évidentes de masse et de continuité, nous devons considérer sa composition comme invariable, abstraction faite de l'action de l'atmosphère. Là-dessus pas de contestation possible.

Nous appelons *blanc subjectif* une lumière qui nous donne la sensation de blanc : définition éminemment arbitraire et indéterminée.

Si le blanc subjectif est caractérisé par des rapports entre les sensations fondamentales invariables et indépendantes de l'intensité absolue, le point W figuratif du blanc est lui-même invariable dans le triangle des sensations Σ_1 Σ_2 Σ_3. En vertu du phénomène de Purkinje, il est donc variable dans le triangle P Q R où les points P, Q, R, sont considérés comme fixes; autrement dit, une lumière blanche pour certaines valeurs des intensités, cesse de l'être pour la même composition relative mais pour des intensités différentes.

Au contraire d'après les expériences d'Helmholtz, le point W serait invariable par rapport aux points P, Q, R, considérés comme fixes; autrement dit, si nous réalisons du blanc avec des radiations ayant certaines intensités, la couleur résultante reste encore blanche quand nous faisons varier les intensités dans le même rapport. Le blanc subjectif serait donc caractérisé par une composition invariable; conséquemment il serait représenté dans le plan des sensations par un point variable.

Résumons les deux thèses : le blanc correspond à des rapports déterminés des sensations fondamentales, donc à des rapports variables des excitations; le blanc correspond à des rapports déterminés des excitations, donc à des rapports variables des sensations.

La thèse d'Helmholtz est la conséquence de la *théorie empirique* d'acquisition des notions usuelles. En définitive ce que nous appelons *blanc*, c'est la couleur du papier sur lequel nous écrivons (qui par parenthèse n'est jamais blanc). Nous l'appelons *blanc* à midi comme au crépuscule, c'est-à-dire pour une composition peu différente de la lumière solaire, mais pour des intensités relatives qui le sont beaucoup. Nous l'appelons encore *blanc* vu au clair de la lune.

Nous groupons ainsi sous le même nom de *blanc* des sensations en définitive très différentes par leurs intensités, et, en raison du phénomène de Purkinje, par les rapports des actions sur les trois sortes d'appareils récepteurs.

Cependant nous avons conscience de l'imprécision de cette appellation. Aussi quand le peintre veut représenter un homme lisant le journal au clair de la lune (? !), peint-il le papier en bleu (*ton froid*), obéissant instinctivement à la loi de Purkinje; seul un poète pour qui le monde extérieur n'existait pas (à l'exception des bouteilles), ose parler du « clocher jauni » par la lune. Pour donner l'impression du plein soleil, le peintre use de tons *chauds*, c'est-à-dire tirant sur le jaune.

Il semble donc que si le langage habituel nous fait appeler blanc des

lumières d'une composition déterminée, nous devons conserver ce terme pour des lumières produisant sur les appareils récepteurs des sensations dans un rapport déterminé : ce qui n'est pas la même chose, en raison du phénomène de Purkinje.

245. Position des sensations fondamentales dans le plan PQR.

1° — Il s'agit de placer dans le plan PQR les points Σ_1, Σ_2, Σ_3, figuratifs des sensations fondamentales. La seule condition théorique à laquelle ils doivent satisfaire, est d'être en dehors de la courbe sur laquelle se rangent les couleurs simples (fig. 206) : le triangle $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ contient en effet toutes les sensations possibles. *Cette condition laisse évidemment place à la plus grande indétermination.*

De ce que la courbe des couleurs simples ne se réduit pas à trois segments de droites, résulte que, où qu'on place les points Σ_1, Σ_2, Σ_3, *certaines sensations sont possibles qui ne peuvent être obtenues par le mélange des couleurs.* En effet leurs points figuratifs sont en dehors de tout polygone ayant des couleurs simples à ses sommets.

Autre conséquence : si, par commodité, nous disons que les sensations fondamentales sont *rouge*, *verte*, et *bleue*, il n'en est pas moins vrai que toutes les couleurs excitent simultanément les trois sensations, mais en proportions très différentes.

Toutefois comme les sensations colorées *possibles* ne diffèrent qu'exceptionnellement des sensations obtenues par l'addition de couleurs simples ou complexes, il est probable que le triangle $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ ne diffère pas beaucoup du triangle PQR.

2° — Les couleurs *qu'on ne peut produire immédiatement par la lumière extérieure*, étant toutes plus éloignées du blanc que les couleurs spectrales, doivent être plus saturées : les couleurs spectrales qui sont pourtant les couleurs *objectives* les plus saturées que nous connaissions, doivent être un peu mélangées de blanc subjectif.

Si l'on découvre un instant les yeux accommodés sur un objet lumineux et qu'on les referme, on continue à percevoir une image dite *accidentelle*, qui peut être de grandes intensité et durée, si l'objet est très lumineux. Nous reviendrons plus loin sur les circonstances de ces phénomènes; nous les signalons ici parce qu'ils permettent d'obtenir des sensations plus saturées que celles engendrées par les couleurs spectrales pures. L'expérience consiste à fatiguer l'œil par la vision prolongée d'une couleur spectrale pure intense; on projette alors l'image accidentelle sur la couleur spectrale pure complémentaire; c'est dire que, tenant l'œil ouvert, on regarde un fond uniformément éclairé par la complémentaire.

Aux points fatigués de la rétine, on perçoit une couleur plus saturée qu'aux points de la rétine environnants. Donc les couleurs objectives les plus saturées (couleurs spectrales pures) ne produisent pas, dans l'œil non fatigué, la sensation la plus saturée possible. Nous n'obtenons

cette sensation qu'en rendant d'abord l'œil insensible à la couleur complémentaire.

246. Diagrammes des matières colorées de Maxwell.

La vérification de la théorie d'Young n'est en aucune manière subordonnée à l'usage de trois couleurs fondamentales simples et à l'emploi d'appareils spectroscopiques coûteux. J'insiste sur l'emploi des disques parce qu'ils offrent un moyen économique de répéter les expériences précédentes et parce qu'ils font admirablement comprendre le point de départ et l'essentiel de la théorie d'Young.

Fig. 210.

Les premières expériences sont dues à Maxwell, mais j'emprunte les nombres à Rood qui s'est beaucoup occupé de la question (fig. 210).

1° — Partons de trois disques peints avec du *vermillon* R, du *vert émeraude* V, et de l'*outremer* B ; *ces matières colorées nous serviront de couleurs fondamentales*. Associons les trois disques; montons sur le même axe (voir § 211) le système des disques blanc et noir de diamètres plus petits destiné à produire du gris; W représente le blanc.

Arrangeons-nous de manière à obtenir deux gris identiques.

En prenant l'angle du secteur qui correspond à chaque couleur, comme mesure de l'intensité, et en divisant la circonférence en 100 parties, nous trouvons l'équation :

$$36\,R + 34\,V + 30\,B = 28\,W.$$

Pour obtenir la position du blanc, nous déterminons le point P par la condition :

$$36\,\overline{RP} = 34\,\overline{VP}.$$

Nous joignons alors les points P et B.

Nous déterminons le point W par la condition :

$$30\,\overline{BW} = (36 + 34)\,\overline{PW} = 70\,\overline{PW}.$$

Cela revient à mettre le point W au centre de gravité des masses 36, 34, 30, placées en R, V, B.

D'après le mode de représentation, nous devrions trouver 100 pour le poids du blanc. Or nous trouvons un secteur qui est seulement les 28 centièmes de la circonférence. Pour avoir 100, il faut multiplier 28 par $w = 3{,}6$; w est le *coefficient du blanc* (§ 237).

Par la suite nous multiplierons par ce nombre le secteur blanc utilisé. L'équation corrigée devient :

$$36\,R + 34\,V + 30\,B = 100\,W = 28\,wW.$$

2° — Passons à une matière colorée quelconque, le *jaune de chrome pâle* J par exemple.

Combinons 3 disques J, B, V, de manière à obtenir du gris.

Le résultat brut est représenté par l'équation :

$$27\,J + 12\,V + 61\,B = 32\,W.$$

Commençons par corriger la valeur du blanc :

$$27\,J + 12\,V + 61\,B = 32\,wW = 115\,W.$$

L'équation est encore incorrecte; nous devons affecter le jaune d'un coefficient j de manière à avoir :

$$27\,j + 12 + 61 = 115,$$
$$27\,j = 43, \qquad j = 1{,}6.$$

L'équation corrigée devient :

$$27\,j\,J + 12\,V + 61\,B = 32\,wW,$$

ou si l'on veut :

$$43\,J + 12\,V + 61\,B = 115\,W.$$

Pour placer correctement le point J, on divise le segment BV en deux parties telles que :

$$61\,\overline{BQ} = 12\,\overline{VQ}.$$

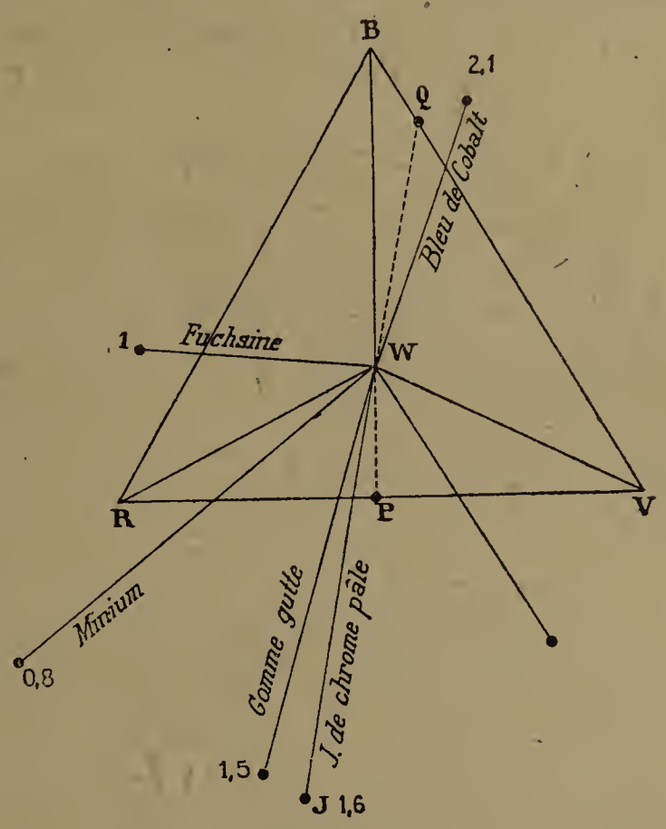


Fig. 211.

On joint le point Q au point W, on prolonge et l'on prend un point tel que le centre de gravité de la masse 73 placée en Q et de la masse 43 placée en J soit précisément au point W que nous connaissons.

D'où la condition :

$$73\,.\,\overline{QW} = 43\,\overline{JW}.$$

D'où le point J. Et ainsi de suite pour les autres couleurs.

On détermine simultanément leur place sur la table et leur coefficient.

3° — Jusqu'ici ni contradiction possible, ni vérification de la théorie.

Mais supposons la table effectuée. Pour obtenir un gris, nous pouvons combiner, par exemple, trois disques couverts respectivement de *fuchsine* F, de *jaune de chrome pâle* J, de *bleu de cobalt* C. Si la théorie

d'Young est vraie, nous devons trouver pour ces matières et pour le blanc des secteurs φ, ι, γ, s, tels qu'on ait l'équation symbolique :

$$\varphi f \mathrm{F} + \iota j \mathrm{J} + \gamma c \mathrm{C} = s w \mathrm{W}$$

avec l'équation ordinaire.

$$\varphi f + \iota j + \gamma c = s w.$$

f, j, c, w, sont les coefficients des matières colorées précédemment déterminés. L'expérience, variée de toutes les manières possibles, confirme la théorie d'Young *dans les limites où elle est vérifiable.*

247. Modification du diagramme.

Les diagrammes analogues au précédent n'ont aucun intérêt pratique; ils ne présentent que l'intérêt théorique de figurer concrètement la marche suivie pour vérifier la théorie d'Young : à savoir, que *pour tout observateur les phénomènes physiologiques ne sont fonction que de trois variables dont les grandeurs sont proportionnelles aux intensités objectives des radiations qui tombent sur la rétine*; ce qui revient à négliger le phénomène de Purkinje. Dans le cas des daltoniens *parfaits*, le nombre des variables se réduit à deux.

Remarquons d'abord qu'un diagramme ne correspond qu'à un observateur particulier. A supposer qu'il existe des équations *moyennes* pour des matières colorées déterminées, elles ne peuvent être que la moyenne des résultats obtenus par un grand nombre d'observateurs, une centaine par exemple. On imagine difficilement la mobilisation de 100 physiciens capables d'effectuer correctement tout ce travail.

D'autre part on n'est jamais sûr que les physiciens qui se sont occupés des couleurs, possédaient des yeux moyens.

En second lieu, même pour un observateur déterminé, l'aspect des diagrammes peut être modifié de bien des manières. Rien n'oblige à mettre nos matières colorées choisies comme fondamentales au sommet d'un triangle équilatéral; rien n'oblige à leur donner les coefficients 1, c'est-à-dire à mesurer leurs intensités relatives par les secteurs qu'ils occupent dans l'expérience qui détermine le point W. Enfin rien n'oblige à prendre trois matières colorées plutôt que trois autres.

Même pour trois matières de noms donnés, les teintes varient suivant le fabricant, suivant que la matière est naturelle ou artificielle, suivant qu'elle est préparée à l'huile, à la gomme, à la gouache, à l'œuf, etc., suivant la nature du substratum (papier, bois, toile)... Bref nous obtenons ce que nous voulons, avec les restrictions imposées par la théorie de Young. Il n'y a donc pas intérêt à compliquer. On a proposé de prendre pour intensités unités des fondamentales, des secteurs en raison inverse de leurs luminosités définies comme au § 212; on a proposé des systèmes plus complexes satisfaisant à des conditions prises à l'avance (Rood). C'est oublier que ces diagrammes ne servent qu'à

fixer les idées; ils ne peuvent avoir la prétention de classer pratiquement les matières colorées (§ 224).

Du moment qu'il ne s'agit que de vérifier la théorie d'Young, peu importe les matières prises pour fondamentales et les unités choisies. Il est avantageux que leurs teintes ne s'éloignent pas trop des fondamentales *simples*; il est naturel de prendre leurs intensités relatives proportionnelles aux secteurs couverts; il est enfin plus simple de mettre leurs points figuratifs aux sommets d'un triangle équilatéral. C'est ce que Maxwell a fait. Ceux qui le critiquent, lui prêtent des intentions de représentation des couleurs qu'il n'avait pas parce qu'il en connaissait l'absolue vanité.

248. Théorie picturale des trois couleurs.

Revenons sur la théorie des trois couleurs picturales.

1°. — Dès avant Newton, c'est-à-dire au début du XVIIe siècle, on connaissait la possibilité d'obtenir toutes les couleurs par le mélange de trois matières colorées, un *rouge*, un *jaune*, un *bleu*. On connaissait donc le fait scientifique fondamental que *les couleurs subjectives sont fonctions de trois variables* : ce sont les trois sensations élémentaires de la théorie d'Young.

Newton ne distinguait pas avec précision l'obtention des couleurs composées par superposition sur la rétine des faisceaux colorés, et l'obtention de ces couleurs par mélange des poudres colorées.

Il remarque toutefois que s'il est aisé d'obtenir du blanc par l'addition de couleurs spectrales, il est quasiment impossible d'en obtenir par un mélange de poudres. Une partie de minium et cinq parties de vert-de-gris triturées ensemble donnent, non du blanc, mais du gris souris. En effet le minium retire de la lumière incidente une partie des radiations, le vert-de-gris en retire une autre : en admettant qu'il reste de quoi composer du blanc, ce blanc ne peut être que très *rabattu* : c'est du gris. Bien entendu éclairé par le plein soleil, ce gris peut paraître blanc : n'empêche que la théorie de son obtention est fort différente de celle du blanc par superposition; ce que Newton ne dit pas.

S'il est facile d'obtenir du noir par mélange de poudres colorées, il est impossible pratiquement d'obtenir du blanc, au point que de toutes les matières colorantes, c'est encore du blanc que le peintre fait la plus grande consommation.

2° — Le lecteur a remarqué que les couleurs fondamentales picturales sont le *rouge* (cinabre ou carmin), le JAUNE (chromate de plomb ou gomme-gutte), le *bleu* (de cobalt ou de Prusse). Pour les physiciens, ce sont le *rouge*, le VERT et le *bleu*. En effet, on obtient des verts relativement saturés par mélange de poudres colorées jaunes et bleues; mais il est impossible d'obtenir un vert *saturé* par superposition de radiations jaunes et bleues; on ne réalise que des verts *blanchâtres*, comme il résulte de l'inspection de la figure 206.

Entre ces deux faits aucune contradiction : il suffit de trouver deux poudres colorées qui l'une et l'autre n'absorbent pas le vert et qui absorbent à elles deux toutes les autres radiations : la lumière émise sera verte et rien ne l'empêche d'être saturée. Or, en vertu de la théorie d'Young, une poudre peut être jaune en diffusant du vert et du rouge; une poudre peut être bleue en diffusant du violet et du vert. Donc rien n'empêche que le mélange de ces poudres diffuse du vert. Mais il serait erroné de croire que le vert résulte *nécessairement* du mélange d'une poudre jaune et d'une poudre bleue : il suffirait d'employer une matière bleue éteignant le vert pour que le résultat fût tout autre. Or c'est un pur hasard si les bleus usuels n'éteignent pas le vert. Du reste la teinte du vert obtenu par mélange varie beaucoup suivant la matière bleue qui intervient.

249. **Acuité chromatique.**

L'expérience montre que la faculté de reconnaître la couleur d'une surface diminue quand l'aire de cette surface diminue. C'est un fait que nous avons déjà utilisé dans la photométrie colorée (§ 132).

Partant de là, les oculistes définissent une *acuité chromatique* que les uns prennent en raison inverse de l'angle apparent du cercle dont on commence à reconnaître la couleur, que les autres prennent en raison inverse du carré de cet angle. Le choix n'a d'intérêt ni scientifique ni pratique, puisqu'il ne s'agit que d'un repérage et non d'une véritable fonction à déterminer.

D'autres classent les yeux d'après la faculté de nommer des teintes plus ou moins lavées de blanc; il n'y a pas lieu d'insister.

250. **Daltonisme.**

1° — On appelle *daltonisme* les maladies de la vision *colorée*, en souvenir de Dalton qui rentrait dans ce cas et l'a fort bien décrit.

Le daltonisme *extrême* consiste généralement dans la cécité pour la sensation élémentaire rouge (*anérythopsie*) ou la sensation élémentaire verte (*achloropsie*).

Comme les points figuratifs des sensations élémentaires diffèrent peu des points P, Q, R, raisonnons comme s'ils coïncidaient.

L'œil insensible à la sensation P considère comme identiques toutes les couleurs situées sous une droite PB quelconque passant par B; elles ne diffèrent en effet que par la quantité relative de la couleur principale P qui par hypothèse n'est plus perçue.

Toutes ces couleurs ont même intensité pourvu que les quantités des couleurs Q et R restent les mêmes.

Toutes les sensations colorées de l'anérythope sont donc représentées sur la droite RA.

La sensation de blanc correspond à la droite entière PW.

Pour un œil sain, les couleurs qui se trouvent sur PW, de part et

d'autre du point W, sont complémentaires. Pour l'œil où la sensation P est abolie, elles se confondent. On peut donc trouver une série de couleurs complémentaires qui paraissent blanches au daltonien.

Tout ce qui précède s'applique *mutatis mutandis* à l'*achlorope*.

2° — Qu'il soit anérythrope ou achlorope, le malade confond toutes les couleurs situées sur la droite PQ. Il ne voit pas les fraises au milieu de leurs feuilles; les oranges ne se distinguent pas davantage des feuilles qui les entourent.

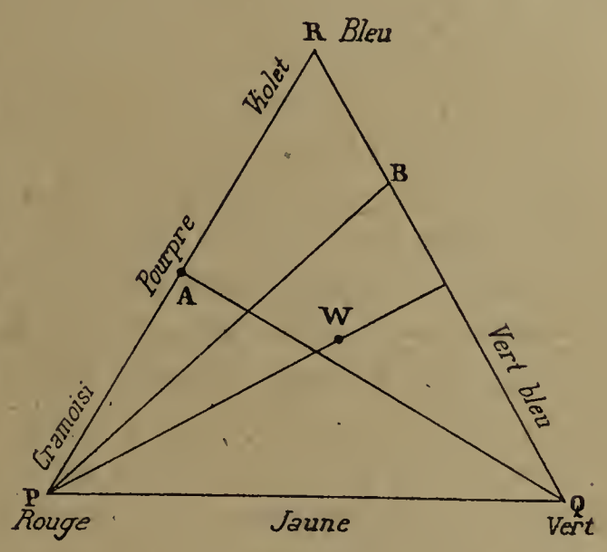


Fig. 212.

Dans une collection d'écheveaux de laine de couleurs variées on désigne au malade un écheveau pourpre (point figuratif A). On le prie d'assembler les écheveaux de teintes semblables

L'anérythrope confond les couleurs qui se trouvent sur la droite PA il associe donc au pourpre des teintes *bleues*.

L'achlorope confond les couleurs qui se trouvent sur la droite OA; il associe donc au pourpre des teintes *vertes*.

Superposons du rouge P et du vert Q : pour un rapport convenable des intensités, nous réalisons l'équivalent du jaune spectral.

Donnons nous l'intensité de ce jaune; nous avons :

$$pP + qQ = jJ.$$

Pour les yeux sains les coefficients p et q sont bien déterminés et à peu près les mêmes pour tous les observateurs. Pour l'anérythrope le coefficient p est indéterminé, pour l'achlorope c'est le coefficient q; tandis que le coefficient q pour l'anérythrope et le coefficient p pour l'achlorope ont à peu près les mêmes valeurs que pour l'œil sain.

3° — L'absorption de $0^{gr},60$ de santonate de soude produit la cécité pour le bleu; la sensation R est abolie. Pour le malade toutes les teintes perceptibles sont obtenues par les mélanges de rouge P et de vert Q.

Il confond avec du blanc les teintes de la droite RW, il voit donc blanc, des jaunes et des bleus. Mais connaissant les couleurs habituelles des objets, il énonce ses sensations en disant qu'il voit les blancs jaunes verdâtres.

Les aveugles pour le bleu sont plus rares que les aveugles pour le rouge ou le vert. La proportion des cas de cécité quasi complète est pour ces derniers de l'ordre de 1 à 2 pour 100. L'existence des cas extrêmes en proportion relative aussi notable amène à penser que la cécité partielle n'est pas rare; elle justifie ce que nous avons dit sur l'impossibilité des mesures absolues et de l'établissement *précis* d'une

table des couleurs. Les équations du § 238 varient d'un observateur à l'autre.

4° — Cécité pour deux couleurs principales.

Il semble que certaines personnes n'ont aucune notion de couleurs : les objets sont pour elles plus ou moins lumineux, sans qu'elles puissent les distinguer autrement. Evidemment le monde perd dans ces conditions une bonne partie de son éclat.

Nous pouvons nous rendre compte très simplement des aspects que prennent alors les objets en éclairant une salle obscure à la lumière du sodium. On rend la flamme d'un bec Bunsen obscure par une arrivée d'air suffisante, on place dedans une baguette de verre : la flamme devient jaune, naturellement aussi les objets qu'elle éclaire.

Il est curieux d'observer un bouquet dans ces conditions. Les gens sont fort laids, encore plus que d'habitude, ce qui n'est pas peu dire.

En approchant une lampe on ramène peu à peu les couleurs accoutumées.

251. Leucoscope.

Le *leucoscope* se compose d'un nicol N_1, d'une ouverture rectangulaire T, d'un spath S, d'un quartz Q taillé normalement à l'axe et dépaisseur variable (*compensateur de Soleil*), d'un second nicol N_2 contre lequel on met l'œil. (On trouvera la figure 213 correspondante à la fin du chapitre VIII.)

Les nicols N_1 et N_2 sont mobiles autour de l'axe de l'appareil.

Le nicol N_1 polarise la lumière. Le spath donne du trou T deux images juxtaposées et polarisées à angle droit. Soit α l'angle de la section principale de nicol N_1 avec la section principale du spath : les intensités des deux images sont $\cos^2\alpha$ et $\sin^2\alpha$.

Le quartz Q étale en éventail les azimuts de vibration des radiations constituant chaque image. Le nicol analyseur N_2 fournit deux images de teintes complémentaires et d'intensités généralement inégales; le rapport des intensités est $\mathrm{tg}^2\alpha$.

On modifie les teintes en tournant le nicol N_2 ou en changeant l'épaisseur e du quartz.

La rotation du nicol N_1 laisse les teintes inchangées; elle modifie seulement le rapport de leurs intensités.

L'expérience consiste à chercher quelles teintes complémentaires confond l'œil de l'observateur. S'il les confond, il les voit *blanches*; d'où le nom de *leucoscope* donné à l'appareil.

Dans l'anérythropsie (cécité pour le rouge) l'œil confond le rouge et le vert bleu. Mais tous n'amènent pas le nicol N_2 dans la même position, preuve que la cécité n'est généralement pas absolue.

Qu'il suffise de savoir que les observateurs confirment la théorie d'Young et d'Helmholtz. Leur détail est d'un intérêt plus que minime.

CHAPITRE VIII

IMAGES ACCIDENTELLES

252. Définition du phénomène : persistance, fatigue, éblouissement.

1° — Lorsque la rétine est subitement soustraite à l'action de la lumière, elle ne reprend pas brusquement son état normal : c'est en cela que consiste la persistance des impressions lumineuses. Si le phénomène est ordinairement négligé *parce qu'il nous gêne*, il est cependant facile à mettre en évidence ; pour peu qu'on ait porté dessus son attention, il se reproduit *consciemment* à tout instant et finit par devenir exaspérant. Son étude est même dangereuse ; il ne faut pas en abuser.

J'ai déjà signalé (§ 193) la fatigue de l'œil.

On résume les phénomènes en disant qu'*après l'action de la lumière, il y a persistance de la sensation et diminution de sensibilité pour de nouvelles excitations de même nature.*

2° — Voici le phénomène qu'on reproduira sans difficulté :

On ferme les yeux pendant un temps assez long, une ou deux minutes par exemple ; pour les mieux protéger contre la lumière antérieure, on les couvre d'un mouchoir.

On se place devant une fenêtre assez éloignée ; on ouvre les yeux, on fixe un point du champ. Après une ou deux secondes ou même une fraction de seconde, on les referme. On aperçoit l'image *persistante* (*ou positive*) de la fenêtre dont on distingue nettement les barreaux *sombres sur fond lumineux.* Plus l'éclairage est intense, plus l'image dite *accidentelle* est nette et dure plus longtemps.

Voici une autre expérience. Tout le monde sait qu'après avoir éteint une bougie dans une chambre qu'elle éclaire seule, on la voit encore nettement pendant quelques secondes ; on en distingue mieux alors des détails qui étaient antérieurement noyés dans son éclat. On distingue mieux la forme d'un filament de lampe à incandescence sur l'image accidentelle que sur l'image directe trop brillante.

En faisant ces expériences, il faut éviter de changer le point de fixation quand les yeux sont ouverts, pour ne pas superposer des images différentes. Après quelques essais (*qu'il ne faut pas répéter trop sou-*

vent), on finit par distinguer à loisir dans l'image accidentelle des détails qu'on n'a pas eu le temps de saisir pendant la seconde ou les quelques secondes que dure l'ouverture des yeux.

Si la lumière extérieure est faible et agit peu de temps, l'image *positive* que nous venons de définir, disparaît ordinairement sans autre phénomène.

Mais si pendant que l'image positive subsiste, on regarde une surface uniformément éclairée, ou si on éclaire les paupières fermées (elles sont translucides), ou encore, dans l'obscurité complète, si l'excitation a été très intense, on voit apparaître une image *négative* complémentaire de la précédente.

Les phénomènes sont très complexes, imparfaitement débrouillés. J'exposerai la théorie de Fechner et d'Helhomltz; si elle ne s'applique pas à tous les cas, au moins elle en contient le plus grand nombre et groupe les plus importants. Comme il s'agit de phénomènes *subjectifs*, comme il est impossible de vérifier le dire des expérimentateurs, il ne faut accueillir qu'avec la plus extrême réserve les découvertes que ne manquent pas de faire de temps à autre de braves gens qui feraient mieux de pêcher à la ligne. On ne doit prendre pour acquis que les faits sur lesquels des expérimentateurs éprouvés sont d'accord.

3° — Les images accidentelles sont dues a une affection de la rétine.

Les images accidentelles sont dues à une modification réelle de la rétine (et non pas à une illusion).

En effet leur grandeur varie avec la distance de la surface sur laquelle on porte les yeux, après les avoir créées en regardant un objet lumineux. L'image qui semble grande sur une muraille éloignée, paraît comme un point sur une feuille de papier voisine de l'œil. Preuve qu'il existe une modification durable de la rétine : la partie modifiée d'étendue constante correspond à des objets extérieurs d'autant plus grands que nous les localisons plus loin.

4° — Éblouissement.

L'*éblouissement* est la limite des images accidentelles. Après avoir regardé le soleil, on devient comme aveugle pendant quelque temps. La tache jaune sur laquelle nous amenons les images des objets que nous fixons, est comme recouverte d'un cercle dont la coloration se modifie peu à peu et où les images des objets médiocrement éclairés ne sont plus perceptibles. La rétine a subi une modification assez profonde pour durer plusieurs minutes, et même, dans des cas exceptionnels, plusieurs dizaines de minutes.

253. Expériences sur la rotation de l'œil au moyen des images accidentelles.

Avant d'aller plus loin, signalons une importante application des images accidentelles (§ 29ter).

Puisqu'elles sont dues à une modification subpermanente de la rétine, elles occupent sur elle une position indépendante de la rotation de l'œil dans son orbite. D'où la possibilité d'étudier les rotations de l'œil par la position et l'orientation des objets fictifs extérieurs que nous faisons instinctivement correspondre aux modifications de la rétine.

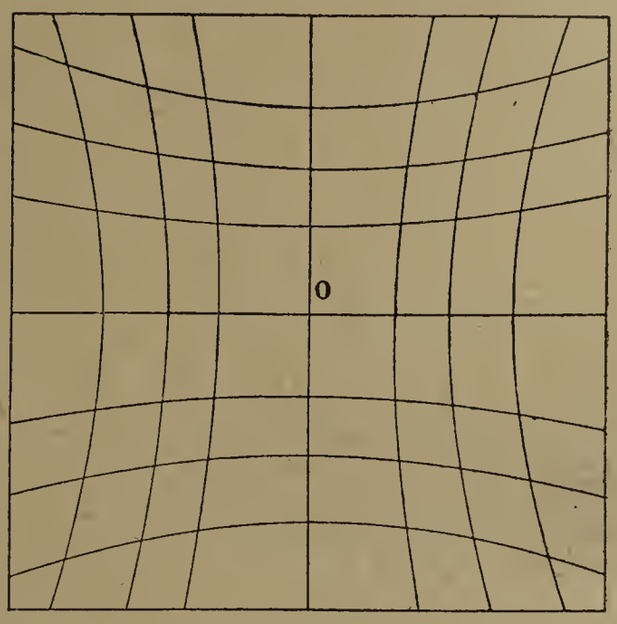


Fig. 214.

Voici la marche des expériences.

On se place en face d'un mur sur lequel sont tracées des droites verticales et horizontales bien visibles, mais ne tranchent pas assez sur le fond pour gêner la vision des images accidentelles; le fond le plus commode est gris pâle mat. On tend à la hauteur de l'œil de l'observateur, verticalement ou horizontalement, un ruban noir ou blanc tranchant nettement sur le fond. On assure par un support la fixité de la tête.

On fixe le milieu du ruban (point O des figures 214 et 215), puis brusquement, *sans bouger la tête*, on dirige le regard vers un point R du plan de projection. On détermine alors aussi approximativement que possible l'angle que fait l'image accidentelle avec les lignes tracées sur ce plan.

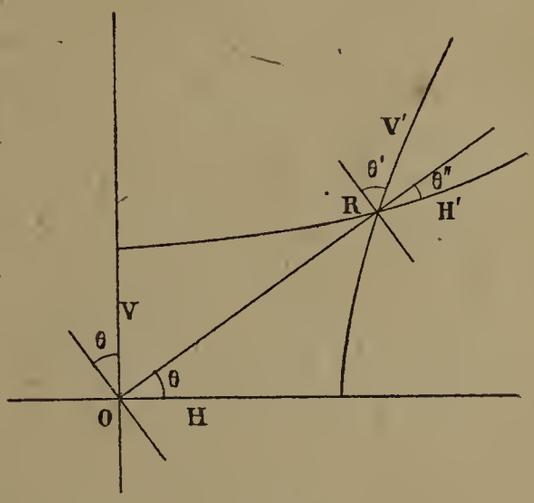


Fig. 215.

Conformément à la loi de Listing (§ 29), on vérifie qu'en portant le regard *en haut et à droite* (fig. 215) *ou en bas et à gauche*, l'image horizontale tourne *sinistrorsum*, l'image verticale tourne *dextrorsum*. C'est l'inverse, quand on regarde *en haut et à gauche* ou *en bas et à droite*. Le sens des rotations est le même pour les deux yeux.

La figure 214 représente l'ensemble du phénomène. L'image accidentelle due à l'élément de droite horizontale vue dans la position primaire, est tangente aux courbes presque horizontales; l'image accidentelle due à l'élément de droite verticale vue dans la position primaire, est tangente aux courbes presque verticales.

254. Inégalité de la persistance pour les diverses couleurs. Un premier groupe de phénomènes vient de ce que la persistance ne

suit pas la même loi pour les trois sensations fondamentales que nous appelons *rouge*, *verte* et *bleue* pour abréger.

Posons que les sensations fondamentales, d'abord égales, diminuent comme l'indique la figure 216. La décroissance étant d'abord plus rapide pour le rouge, l'image accidentelle devient bleue verdâtre. Mais le rouge

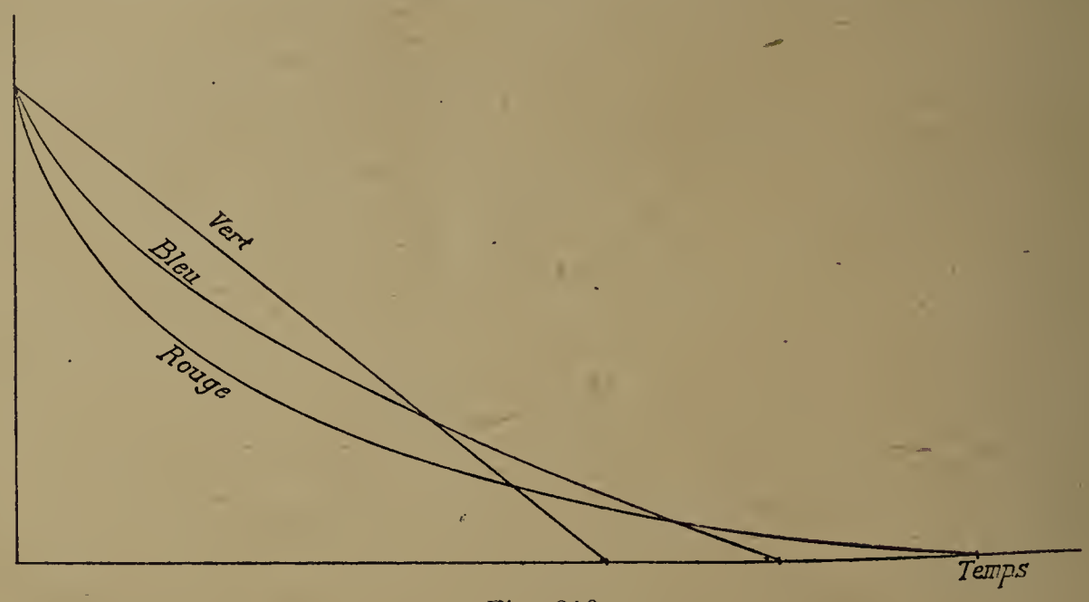


Fig. 216.

finissant par subsister seul ou mélangé de bleu, l'image vire au violet et devient rose. Dans l'ensemble on explique ainsi des variations de teinte extrêmement complexes.

Nous supposons le champ tout à fait obscur; nous écartons de l'expérience toute excitation supplémentaire.

Les courbes différant certainement d'un observateur à l'autre, rien d'étonnant à ce que le détail du phénomène varie suivant les individus.

255. Rôle de la fatigue. Images accidentelles négatives.

1°. — En dehors de l'inégalité de la persistance, dans nombre de phénomènes intervient *la fatigue*, c'est-à-dire *la diminution de sensibilité pour les excitations de même espèce.*

On regarde un objet coloré sur fond noir, en fixant un point de cet objet. Au bout de quelque temps, la couleur semble perdre son éclat. On porte alors brusquement les yeux sur une surface *blanche*; on voit une image de même forme que l'objet, *mais d'une couleur complémentaire.* Ainsi la contemplation d'un objet rouge donne naissance à un objet vert, et réciproquement. Si l'objet est jaune ou bleu, l'image sera violette ou orangée; et réciproquement.

Un objet blanc sur fond noir donne une image noirâtre; un objet noir sur fond blanc donne une image qui se détache en clair.

Ces images sont d'autant plus nettes et durables qu'on a regardé l'objet plus longtemps.

L'explication est simple : les appareils sensitifs de l'œil, quels qu'ils soient, sont fatigués d'autant plus qu'ils sont plus excités, que par con-

séquent la lumière qu'ils reçoivent, agit davantage sur l'un ou su l'autre. Si donc on regarde une surface médiocrement éclairée, l'action qu'elle produit est d'autant plus intense que l'organe est moins fatigué : d'où la couleur complémentaire.

Si l'excitation primaire n'est pas prolongée trop longtemps, l'image accidentelle est d'abord positive; puis elle s'efface et est remplacée par la négative.

2° — La fatigue est fonction de la durée de l'excitation; mais il est probable qu'elle ne se produit pas suivant la même loi pour les trois organes récepteurs. A ce sujet voici une expérience de Fechner.

Il ferme les yeux pendant un certain temps, les ouvre et regarde sur un fond noir un papier blanc éclairé par le soleil. Il est d'abord ébloui, puis le papier se colore successivement en jaune, en bleu, enfin en pourpre. C'est admettre que la rétine se fatigue d'abord pour le bleus mais qu'en définitive c'est la sensation verte qui est le plus atténuée.

3° — On explique de même que dans la première expérience, la couleur complémentaire ne se maintienne pas invariable. En effet la fatigue ne cesse nécessairement pas avec la même vitesse pour les trois appareils récepteurs : d'où une variation de la couleur donnée par la lumière blanche.

4° — Rappelons une curieuse observation de Tait refaite par Rood.

Pendant une maladie, chaque fois qu'il se réveillait, la flamme d'une lampe munie d'un abat-jour en verre dépoli lui paraissait rouge foncé pendant une seconde environ. Faut-il conclure de là que les nerfs visuels, qui correspondent aux sensations fondamentales verte et bleu, ne se réveillaient qu'après ceux qui correspondent à la sensation rouge?

256. Lumière propre de l'œil.

Pour obtenir les images accidentelles *négatives*, nous fatiguons la rétine, puis nous l'excitons par une faible lumière blanche : nous admettons que les excitations dues à cette lumière sont modifiées par la fatigue préalablement imposée.

Cette théorie ne s'applique évidemment pas aux images accident elle négatives *observées dans l'obscurité complète;* car la fatigue importe peu pour un organe auquel on ne demande rien.

Helmholtz observe qu'indépendamment des phénomènes lumineux accompagnant certains états morbides de l'œil ou du corps entier, il existe toujours une sorte de clarté dans le champ visuel obscur. On se met dans une chambre non éclairée, on ferme les yeux; après un temps suffisant pour que les images accidentelles aient disparu, on voit un champ faiblement et irrégulièrement lumineux, avec des taches qui, chez certains (moi par exemple) semblent des nébuleuses animées d'un mouvement gyratoire lent.

Il suffit d'admettre que l'excitabilité de la rétine à l'égard de cette

lumière intérieure est modifiée comme à l'égard de la lumière extérieure, pour rendre compte des phénomènes susdits.

Les images accidentelles négatives se présentent comme une diminution des sensations lumineuses, qui peut provenir de la diminution sélective de l'excitation due à une cause extérieure, comme de la diminution d'activité propre. Quand la rétine est fatiguée inégalement pour les divers appareils récepteurs, la lumière interne est colorée par suppression partielle de l'activité propre de ces appareils.

257. **Alternatives rapides d'ombre et de lumière.**

On fait tourner devant l'œil un disque de carton présentant des secteurs noirs et blancs. Nous savons (§ 164) que pour une vitesse suffisante, le disque paraît d'un gris uniforme. Mais les phénomènes sont plus compliqués quand la vitesse est relativement petite.

Fig. 217.

Helmholtz trouve que pour une certaine vitesse le disque est vert, et pour une vitesse supérieure, il est rose. Il faut seulement prolonger l'observation pendant quelque temps pour amener l'œil à un certain état de fatigue.

Rood trouve que, pour une même vitesse, le phénomène est différent suivant le point de la rétine. Il regarde les nuages blancs à travers un disque dans lequel sont découpés quatre secteurs équidistants d'angle petit (de l'ordre de 10°). Pour 9 tours par seconde, le ciel paraît pourpre sauf au voisinage du point de fixation où il est jaune. Pour 11 tours, la partie centrale toujours irrégulière grandit; elle est vert bleuâtre et bordée de bleu pâle; elle se détache sur un fond rouge. Pour 15 tours le champ redevient uniforme et vert bleu. Enfin pour des vitesses supérieures, le ciel est blanc, comme le veut le principe de Talbot (§ 164).

Il serait bien difficile de donner une théorie quantitative de ces phénomènes. Toujours est-il qu'ils prouvent l'inégalité des trois sensations moyennes sous l'influence d'excitations interrompues, et la non-homogénéité de la rétine. Le § 193 faisait prévoir cette non-homogénéité.

Illusions colorées. Contraste simultané.

258. **Expériences fondamentales.**

Précisons en quoi diffèrent le *contraste successif* étudié ci-dessus et le *contraste simultané*.

1° — Contraste simultané.

Sur deux feuilles de papier, l'une rouge, l'autre verte (fig. 218), plaçons

deux petits carrés de papier rouge. *Celui qui est sur fond vert paraît plus rouge que l'autre* : tel est l'effet du *contraste simultané*.

Le phénomène est dû en partie à des modifications réelles de la rétine (identiques aux modifications ci-dessus étudiées), en partie à des erreurs d'appréciation. On dit que le *contraste simultané* est *pur*, lorsqu'on se place dans des conditions telles que le phénomène ne soit dû qu'à des erreurs d'appréciation.

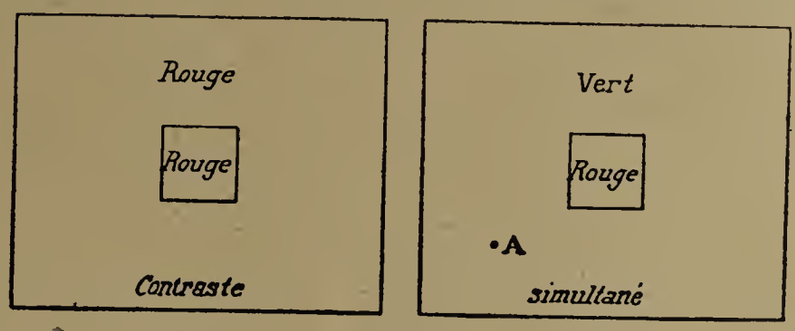


Fig. 218.

2° — Contraste successif.

Reprenons les phénomènes simples de *contraste successif* (fig. 219).

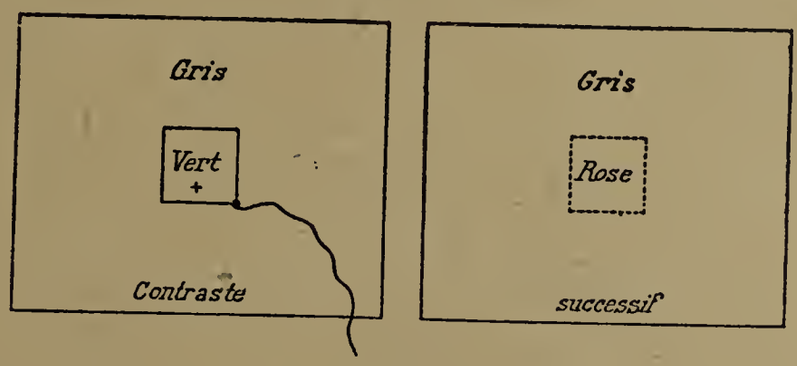


Fig. 219.

Plaçons un carré vert sur du papier gris; fixons les yeux sur la croix, c'est-à-dire fatiguons pour le vert certains points de la rétine.

Arrachons le carré : l'endroit où il se trouvait, paraît rose; le rose est complémentaire du vert.

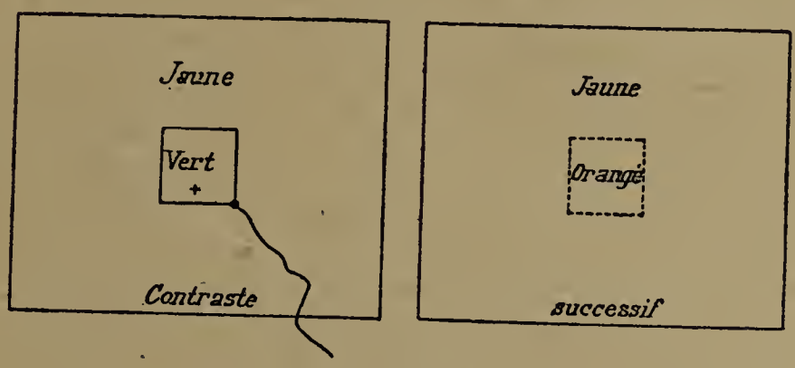


Fig. 220.

Plaçons un carré vert sur du papier jaune; fixons les yeux sur la croix. Arrachons le carré : l'endroit où il se trouvait paraît orangé; l'orangé est la couleur qui résulte de la composition du rose précédemment obtenu et du jaune actuel (fig. 220).

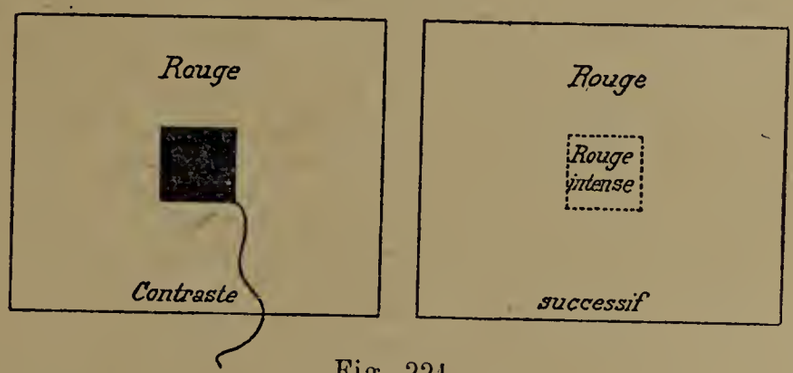


Fig. 221.

Plaçons un carré noir sur du papier rouge; fixons les yeux sur un de ses points : toute la rétine se fatigue pour le rouge sauf les points recouverts par l'image du carré. Arrachons-le : l'endroit où il se trouvait paraît rouge intense (fig. 221).

Plaçons un carré vert sur du papier rouge (fig. 222). Fixons un de ses points Arrachons-le : l'endroit qu'il occupait, paraît rouge intense. C'est l'expérience à laquelle correspond la figure 220, avec cette particularité que les couleurs des papiers sont complémentaires.

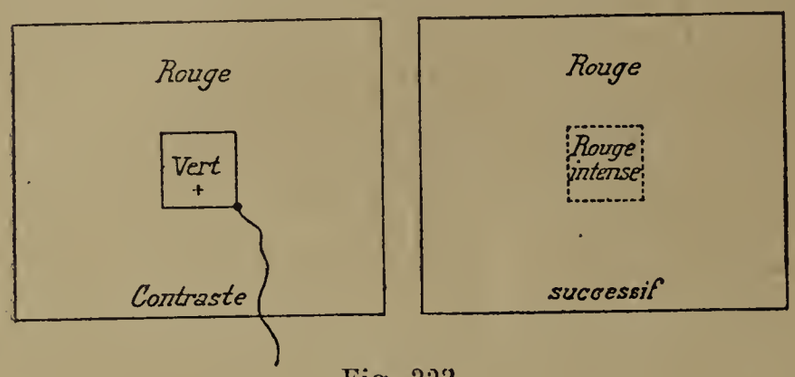


Fig. 222.

3° — Rôle du contraste successif dans le contraste simultané.

On est d'abord tenté d'expliquer complètement le contraste simultané par le contraste successif. Fixons le point A (fig. 218) : nous fatiguons l'œil pour le vert. Si alors nous revenons à fixer le carré rouge, rien de surprenant à ce que le rouge soit exalté.

Cette explication est exacte mais insuffisante. Pour le prouver, il suffit d'empêcher le mouvement des yeux, ce qui est plus facile au moyen des *ombres colorées*. Nous montrerons ainsi qu'une part du phénomène réside dans une fausse appréciation.

259. Ombres colorées.

On éclaire simultanément une feuille de papier par la lumière du jour (en se plaçant loin d'une fenêtre, par exemple) et celle d'une bougie; une baguette de bois, placée devant le papier, donne deux ombres (§ 107). Celle de la lumière du jour n'est éclairée que par la bougie : *elle est réellement rougeâtre*. Celle de la bougie est éclairée par la lumière du jour : *elle paraît bleue*, bien que sa couleur réelle soit blanche.

C'est l'effet du *contraste simultané*.

Le phénomène ne tient pas à ce que le papier a changé de couleur dans l'ombre de la bougie : la preuve en est que nous le voyons *blanc* si nous regardons au moyen d'un tube noirci intérieurement qui isole l'ombre de la bougie. Mais dès que nous voyons dans le tube un peu de la région qui entoure l'ombre (région éclairée par la bougie, par suite réellement rougeâtre), l'ombre réapparaît bleue.

Il s'agit bien d'une illusion colorée.

Pour distinguer le *contraste simultané* du *contraste successif*, on fixe un point déterminé. On empêche ainsi la portion de rétine où doit se former l'image de l'ombre de la bougie, d'être impressionnée par l'espace environnant. Pour réaliser au mieux l'expérience, on marque sur le papier un point P de l'espace que l'ombre occupera. On cache alors la bougie avec un écran. On fixe le point P, on découvre la bougie; *l'espace occupé par l'ombre change brusquement de teinte.*

Si le regard est mobile, les images accidentelles renforcent l'illusion colorée. En regardant le champ rougeâtre éclairé par les deux sources,

l'œil devient relativement insensible pour le rouge; un champ blanc lui paraît bleu. Mais que les phénomènes soient de même sens, n'est pas une raison de confondre une modification objective de la rétine avec une fausse appréciation de la couleur.

On répète commodément l'expérience en remplaçant la lumière du jour par un bec Auer, une flamme d'acétylène, ou une lampe à incandescence *à filament métallique*. Il est intéressant de comparer sous ce rapport deux lampes à incandescence, l'une à filament de charbon, l'autre à filament métallique.

260. **Autres expériences.**

1° — On fait avec des disques une expérience intéressante.

Peignons en jaune J et en bleu B un secteur assez étroit pour que, dans les anneaux obtenus par la rotation rapide, le blanc soit à peine

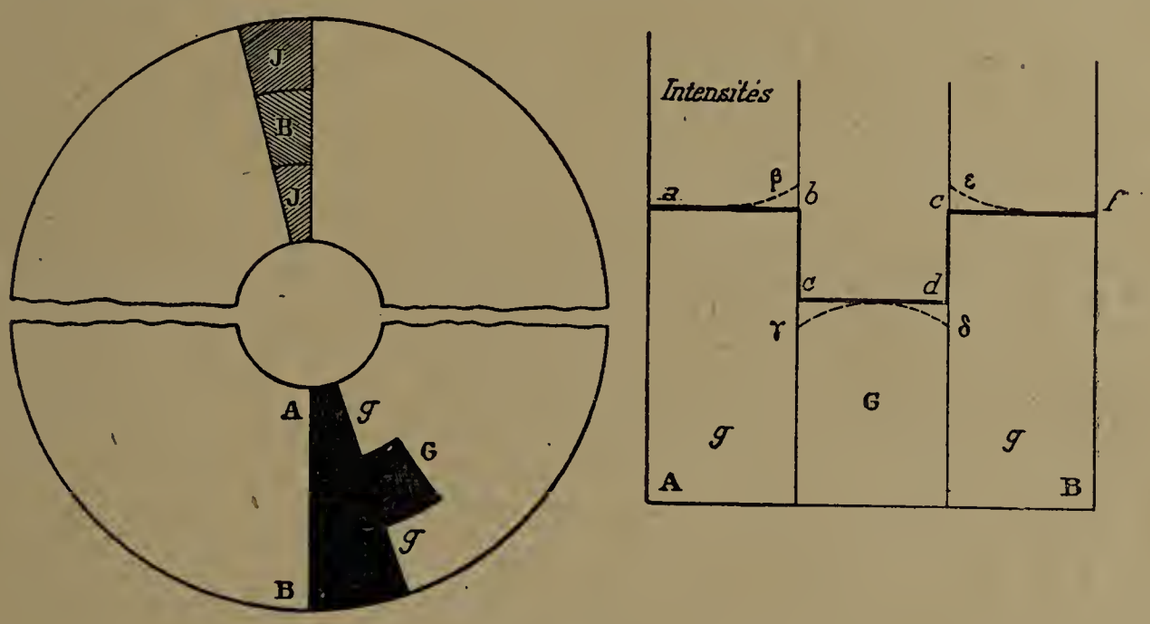


Fig. 223.

teinté. Les bords des anneaux J en contact avec l'anneau B deviennent franchement jaunes par contraste; les bords de l'anneau B franchement bleus. Le phénomène disparaît en grande partie quand on sépare les anneaux par des traits noirs, ce que nous sommes bien forcés de faire dans la figure schématique.

2° — La même expérience réussit avec des secteurs noirs. Au lieu d'être *uniformément* gris, gris foncé en G, gris clair en *g*, les anneaux sont *nuancés*. Les anneaux gris clairs sont plus clairs au voisinage de l'anneau plus foncé, dont les bords paraissent eux-mêmes plus foncés. La courbe schématique des intensités *a b c d e f* est remplacée par la courbe $a\,\beta\,\gamma\,\delta\,\varepsilon\,f$.

Pour être dans le cas du *contraste simultané pur*, on évitera de déplacer le point de fixation, par exemple on fixera toujours le centre du disque.

3° — L'expérience suivante montre que les effets de contraste sont particulièrement nets avec les teintes pâles et peu saturées.

Sur un papier vert plaçons un carré de papier gris foncé ; il ne change pas sensiblement de teinte. Recouvrons les deux papiers avec une feuille de papier blanc *translucide* (papier à lettre mince) ; le papier gris paraît rose. Le résultat est très surprenant.

261. Cœurs dansants.

La théorie du phénomène connu sous le nom de *cœurs dansants* n'est pas très sûre.

On peut seulement affirmer que le contraste y entre pour beaucoup.

Sur un carton coloré en vermillon, par exemple, on réserve de petites taches bleues. Quand on fait osciller le carton devant l'œil, les taches semblent danser sur le carton d'une façon bizarre. L'expérience ne réussit qu'avec une lumière faible et avec des couleurs quasi complémentaires pour les taches et le fond.

Le phénomène est sûrement dû à ce que l'œil cherche à suivre les taches et n'y parvient qu'imparfaitement : les taches se déplacent donc sur la rétine. D'autre part le contraste intervient pour modifier les teintes dans les parties des taches et du fond qui sont voisines du pourtour des taches. Les taches ont donc un aspect variable qui dépend à chaque instant des mouvements de l'œil ; d'où l'illusion d'un déplacement relatif des taches et du fond. C'est tout ce qu'on peut dire de général.

262. Éclairage instantané.

1° — On met un petit disque gris sur un large disque couvert d'outremer. On éclaire avec l'étincelle d'une machine de Holtz.

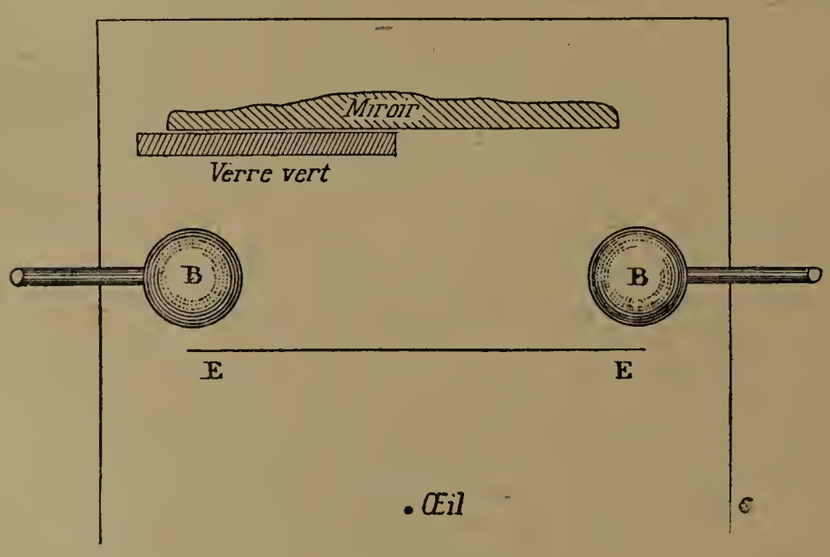


Fig. 224.

On voit le disque gris légèrement coloré de jaune.

Dans cette expérience n'intervient évidemment que le *contraste simultané pur*, puisque les mouvements de l'œil n'ont pas le temps de se produire. Faut-il conclure que la perception du contraste est instantanée? Pas nécessairement, attendu que l'éclairage est assez intense pour produire des images accidentelles sur lesquelles l'attention a tout le temps de s'exercer.

2° — On fait l'expérience d'une autre manière intéressante.

Une étincelle éclate entre les boules B d'un excitateur. L'œil est protégé contre la lumière directe par l'écran E. Il voit le trait de feu par réflexion sur un miroir dont la moitié est recouverte par un verre vert.

Sur la moitié non recouverte, n'apparaît qu'une image qui est *blanche*. Sur la moitié recouverte on en voit deux. L'une provient de rayons ayant traversé deux fois le verre coloré : elle est *verte*. L'autre provient de rayons réfléchis par la face antérieure du verre coloré : elle est *blanche*, mais paraît *rouge* en raison de sa proximité avec l'image *verte*. Même remarque que plus haut.

263. Importance du contraste simultané pour les peintres.

1° — En définitive les couleurs placées les unes à côté des autres n'ont plus leurs valeurs normales (celles qu'elles ont, éloignées de toute autre

Fig. 225.

couleur). Delacroix disait : « Donnez-moi de la boue, j'en ferai la peau d'une Vénus en l'entourant à ma guise. »

Représentons les couleurs (fig. 225) sur une série de rayons, de manière que les complémentaires soient diamétralement opposées.

Quand deux couleurs sont voisines, elles réagissent l'une sur l'autre de manière à accroître la distance angulaire qui les sépare.

Par exemple le groupe rouge-jaune devient rouge-pourpre — jaune-verdâtre; le groupe orangé-jaune devient vermillon-vert; et ainsi de suite.

Si les couleurs groupées sont complémentaires, la règle indique que leur tonalité ne change pas; nous savons que leur saturation et leur éclat augmentent.

Si l'une des surfaces est noire, elle se colore de la complémentaire de l'autre. Des applications vertes sur du drap noir, lui communiquent une teinte rousse; des applications rouges le rendent verdâtre.

Le maximum des changements de teintes a lieu pour les couleurs qui sont voisines sur le diagramme. On sait à quel point sont odieux les réassortiments mal faits. Mieux vaut s'habiller en perroquet rouge-vert, que de mettre au voisinage des tons rouges peu différents.

Mettre ton sur ton, c'est ternir les couleurs, mais c'est aussi exagérer leur différence.

2° — Rood fait à propos du contraste une remarque très fine.

Certains contrastes ternissent les couleurs. On pourrait croire qu'il suffit de prendre les couleurs plus brillantes pour neutraliser l'effet du contraste. Il n'en est rien, parce que le plaisir de la vision des couleurs vient de ce qu'elles sont arrangées et accompagnées de manière à présenter plus que leur éclat naturel. Nous sommes charmés bien plutôt par le tour de force accompli que par le résultat brut. Inconsciemment nous savons gré au peintre d'être lumineux *sans nous fatiguer*, d'employer des couleurs assez ternes pour que les images accidentelles n'interviennent pas, d'user du contraste simultané non compliqué de contraste successif, bref de nous duper par l'habileté de ses arrangements, tout en restant dans une gamme modeste qui laisse notre rétine intacte.

264. **Couleurs vues à travers une autre.**

1° — Voici d'abord la définition du phénomène.

Tenons un voile vert près des yeux, éclairons-le latéralement assez pour que le champ visuel se recouvre d'un reflet vert, le dessin et les plis du voile apparaissant sous forme d'une pâle image de diffusion. Nous voyons les objets noyés dans une ambiance verte; c'est du reste ce qui se produit dans une forêt.

Pourtant on reconnaît sans difficulté leur couleur.

Au bout d'un certain temps, l'œil est fatigué pour le vert; les objets sont vus roses, bien que la lumière verte s'ajoute à leur lumière propre.

Il importe de distinguer cette expérience de celle qui consisterait à mettre devant les yeux des verres verts. Ces verres modifieraient les couleurs émises par les objets, tandis que le voile n'y change rien, ses fils étant opaques et n'agissant que par réflexion et diffusion.

2° — Expérience de Brücke.

On éclaire le côté droit de l'œil droit avec une lampe ou des rayons solaires, de manière que la lumière ne pénètre pas par la pupille. Elle traverse la sclérotique qui est un peu translucide et la colore en rouge. Dans ces conditions les objets blancs se teintent peu à peu de vert pour l'œil droit, cet œil se fatiguant pour le rouge. Par contraste ils sont rougeâtres pour l'œil gauche. Les colorations sont faciles à constater en fermant alternativement les yeux, ou en s'arrangeant de manière à voir double un carré de papier blanc.

L'œil droit regardant une page d'imprimerie voit les caractères rouges par contraste avec le vert du papier.

3° — Expériences d'Helmholtz.

Il place devant les yeux deux morceaux de même épaisseur de verre d'urane. Il regarde, de manière à le voir double, un papier blanc éclairé sur fond noir. Le papier est blanc jaunâtre pour les deux yeux, conformément à la teinte du verre.

Mais le verre d'urane recevant latéralement la lumière solaire directe, émet par fluorescence des rayons verts intenses.

Helmholtz éclaire ainsi le verre qui se trouve, par exemple, devant l'œil droit. Immédiatement le papier blanc paraît rose pour l'œil droit et vert pour l'œil gauche; pourtant l'œil droit reçoit du blanc verdâtre, l'œil gauche reçoit du blanc.

265. Ligne de délimitation.

Des phénomènes de contraste rapprochons le problème suivant : *A quelle condition une ligne délimite-t-elle deux régions dont les éclairements deviennent égaux sur la ligne?*

Si les éclairements sont inégaux, pas de difficulté puisqu'il y a dis-

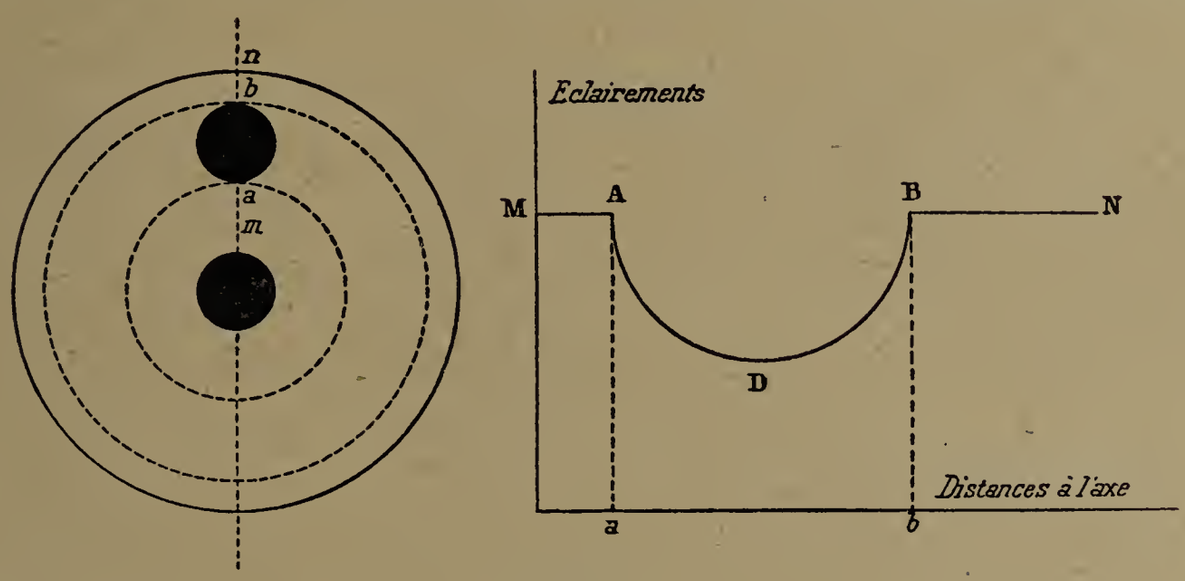


Fig. 226.

continuité; on pourrait croire que la discontinuité des éclairements est nécessaire pour qu'il y ait limitation nette.

L'expérience montre *qu'il suffit d'une discontinuité dans la variation des éclairements.*

Faisons tourner un disque blanc dans lequel est noirci un cercle *ab* de rayon R. Nous voyons en gris la couronne que limite les circonférences en traits interrompus.

A une distance x du centre du cercle noir, le noir occupe une longueur l approximativement représentée par la formule :

$$l = \sqrt{R^2 - x^2}; \qquad \text{d'où :} \qquad \frac{dl}{dx} = \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}.$$

La diminution de l'éclairement est proportionnelle à l.

C'est dire que la courbe représentative de l'éclairement est sensiblement MADBN; ADB est une demi-circonférence.

La discontinuité porte donc, non sur les ordonnées de la courbe représentative des éclairements, mais sur les coefficients angulaires de la tangente à cette courbe. On constate pourtant que l'anneau gris est parfaitement délimité; il paraît même d'un gris uniforme.

Cette règle est d'une grande importance; elle explique la possibilité de la mesure des indices par la réflexion totale (Voir mon Cours sur la *Construction...*)

266. **Rendu pictural.**

1° — Le peintre veut suggérer chez celui qui regarde son tableau, les impressions qu'il a lui-même éprouvées devant un modèle. Mais il ne dispose que de moyens limités. En particulier ses couleurs sont ternes; même avec le meilleur éclairage, leur luminosité est petite. Force est donc pour le peintre de représenter non pas la réalité, mais les apparences qui résultent des lois de l'Optique physiologique. Il montre *ce qu'il voit*, tandis que s'il disposait de lumières aussi intenses que les réelles, il pourrait reproduire *ce qui est,* laissant aux lois de l'Optique le soin de faire le reste.

Quelques exemples expliqueront les sens de ces formules générales déjà rencontrées au § 127.

2° — Loi de Purkinje.

Le peintre veut représenter la lumière éclatante du soleil tombant sur un corps blanc. L'éclat de son blanc est médiocre; il est blanc (§ 195), mais il ne renvoie qu'une petite fraction de la lumière reçue. Par exemple, un morceau de craie se détache en gris sur un nuage blanc, sur un champ de neige....

Pour se tirer d'affaire, le peintre réalise les conséquences de la loi de Purkinje : *il teint son blanc de jaune.* Une lumière blanche intense nous paraît jaune; le blanc du peintre est terne : *il substitue donc l'effet à la cause.* Ce blanc qui ne peut pas nous paraître blanc en raison de son peu de brillant, il lui ajoute une couleur « chaude ».

Inversement, voyant l'effet, nous imaginons la cause; c'est ainsi qu'un paysage à travers un verre jaune nous paraît ensoleillé.

En vertu des mêmes lois psychologiques, quand le peintre veut représenter le crépuscule, la nuit,..., il mélange son blanc de couleurs « froides », de bleu, de violet. S'il employait des couleurs d'intensité aussi faible que celles des corps qu'il doit représenter, son tableau serait uniformément noir (§ 213). Pour qu'on distingue quelque chose sur sa toile, il force les intensités; *mais il donne l'impression d'une lumière plus atténuée en la bleuissant.*

Il reste donc à peu près toujours dans les mêmes intensités absolues; mais par un judicieux trompe-l'œil, il suggère les intensités les plus fortes par des jaunes et des rouges, les plus faibles par des bleus et des

violets. La loi de Purkinje, qui s'applique aux couleurs réelles à représenter, ne s'applique pas aux couleurs qu'il utilise: il représente donc ses effets pour nous suggérer l'existence de leur cause.

3° — Irradiation.

Le peintre veut figurer la flamme d'une bougie, d'une torche,... plus généralement un espace très lumineux sur un fond sombre (vitrail d'une cathédrale vu de l'intérieur,...). Il représente *les effets* de l'irradiation, effets qui bien entendu ne se produiraient pas avec les couleurs toujours ternes dont il dispose. C'est ainsi que le soleil est pour lui non plus une surface lumineuse circulaire, mais un disque aux bords flous, auréolé de rayons. La flamme d'une bougie est une tache lumineuse qui s'étale irrégulièrement. Le vitrail n'est plus nettement délimité; on n'en voit plus les barreaux qui sont mangés par la lumière.

4° — Addition des couleurs. Perspective aérienne.

Quand les objets sont très éloignés, leurs images ne sont plus distinctes; elles se superposent sur la rétine, fusionnant leurs couleurs par addition (§ 220). D'où une teinte neutre, *uniforme*, bleuâtre en général, caractéristique des lointains. Certes la coloration qui résulte d'une absorption sélective des radiations par l'atmosphère, modifie cette teinte; elle existerait cependant pour un air parfaitement transparent, à moins que par hasard il ne s'agisse d'objets monochromes de grandes dimensions.

On donne le nom de *perspective aérienne* aux modifications de la couleur dues à l'absorption par l'air et à la superposition sur la rétine des images de corps voisins diversement colorés, phénomènes qui tiennent tous deux à l'éloignement des objets.

5° — Ombres colorées.

L'ombre d'un cardinal est noire, personne n'en doute. Mais si le cardinal est en plein soleil, son ombre paraît verte. Le peintre qui veut représenter le cardinal en plein soleil, utilise des rouges qui, même les plus brillants et faute d'un éclairage suffisant, sont trop ternes pour produire un effet de contraste simultané; conséquemment l'artiste supplée à la cause en peignant l'effet : il met du vert dans ses ombres.

Vision binoculaire des couleurs.

267. Vision binoculaire des couleurs.

L'expérience consiste à mettre devant l'un des yeux un verre *rouge*, par exemple, et devant l'autre un verre *vert* de luminosités à peu près égales (d'une manière plus générale, à recouvrir les yeux de verres de teintes différentes). Les objets paraissent d'abord tachetés en rouge et en vert, avec des alternatives de coloration. Au bout de quelque temps, leur teinte devient uniforme; mais elle ne semble pas être identique à

celle qu'on obtiendrait en superposant les deux faisceaux colorés sur l'une des rétines.

Les alternances n'ont rien qui puisse étonner, connaissant la facilité avec laquelle nous savons neutraliser l'un des champs visuels (§ 50). C'est même en cela que la vision binoculaire diffère profondément de la vision monoculaire des couleurs : dans ce *dernier* cas il nous est impossible de dissocier les teintes reçues.

Voici comment Helmholtz facilite la dissociation.

Il utilise une sorte de stéréoscope de Wheatstone (fig. 227) dont les miroirs sont remplacés par deux verres colorés R et B (rouge et bleu,

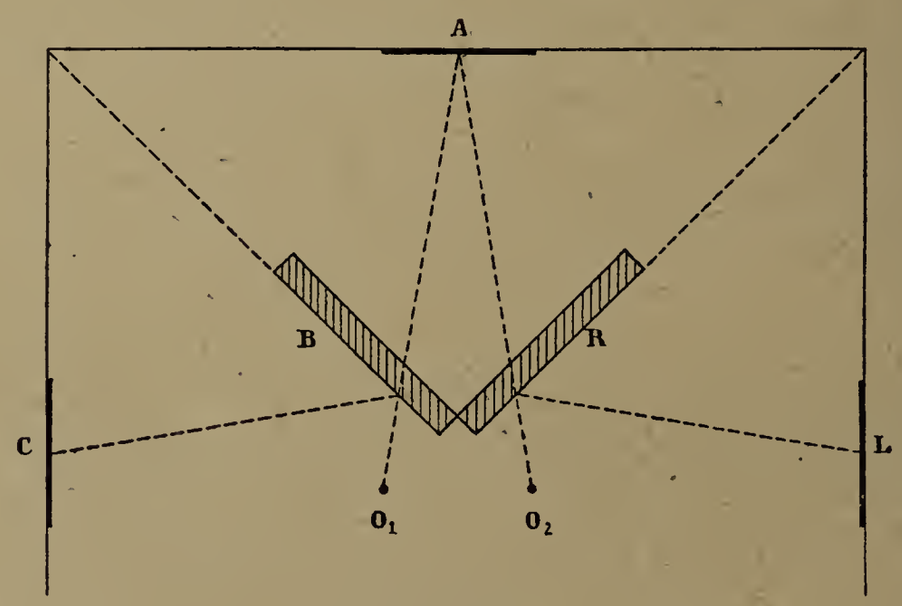


Fig. 227.

par exemple). En L et C sont des dessins très différents, des lettres et des chiffres par exemple, qu'on ne puisse confondre; on s'arrange de manière à les éclairer peu, tandis que la surface *blanche* A l'est vivement. L'œil droit voit simultanément le dessin L (*lettres*) par réflexion et la surface A *rouge* par transmission; l'œil gauche voit simultanément le dessin C (*chiffres*) par réflexion et la surface A *bleue* par transmission.

Voici maintenant l'expérience. Suivant qu'on porte l'attention sur les lettres ou les chiffres, on voit la surface A rouge ou bleue. Autrement dit, les lettres paraissent rouges pur sur un fond rouge blanchâtre; les chiffres paraissent bleus pur sur un fond bleu blanchâtre. Curieux phénomènes à comparer au § 79.

268. **Lustres; lustre stéréoscopique. Effet de neige.**

On appelle *surfaces lustrées* les surfaces qui réfléchissent la lumière incidente et qui, d'autre part, diffusent comme les corps mats; chacun de leurs points envoie donc dans chaque direction deux faisceaux de lumière dont les intensités varient d'une manière très différente lorsque l'œil se déplace; de sorte qu'il est averti de l'existence de ces deux

faisceaux. Un chapeau haut de forme après un coup de fer présente une surface lustrée; de même une table polie et vernie.

Dans la vision binoculaire d'une surface lustrée, il arrive donc ordinairement que les deux yeux reçoivent, des mêmes points de la surface, des faisceaux d'intensités très différentes.

Cette circonstance devient la caractéristique des surfaces simultanément diffusantes et réfléchissantes.

Inversement supposons que les deux yeux reçoivent des faisceaux d'intensités très différentes : la sensation est interprétée comme le résultat de l'existence d'une surface lustrée. C'est le cas du *lustre stéréoscopique*.

On l'obtient quand, au stéréoscope, les deux images présentent les mêmes teintes, l'une claire, l'autre foncée; en particulier quand l'une est blanche, l'autre noire.

L'image stéréoscopique miroite comme si elle était réfléchissante.

Le phénomène très curieux étonne la première fois qu'on l'observe.

L'importance théorique du lustre stéréoscopique est de montrer que nous avons conscience du rôle joué *simultanément* par les deux rétines et que la sensation binoculaire n'est pas l'addition pure et simple des sensations monoculaires. Mettre du noir devant un œil et du blanc devant l'autre n'équivaut pas à mettre du gris devant les deux.

Quand on regarde au stéréoscope des diapositives, on observe dans les blancs un lustre qui est connu sous le nom d'effet de neige. Il est dû comme le précédent à ce qu'on a conscience de l'existence de deux faisceaux lumineux; l'objet regardé envoie de la lumière et par transmission et par diffusion. Les grands blancs miroitent d'autant mieux qu'on éclaire au moyen d'un papier placé (naturellement au delà de l'épreuve diapositive) assez près pour qu'on en voie plus ou moins distinctement les particularités. Une route en plein soleil fait alors l'effet d'une rivière, ou paraît être recouverte de glace ou d'une neige miroitante.

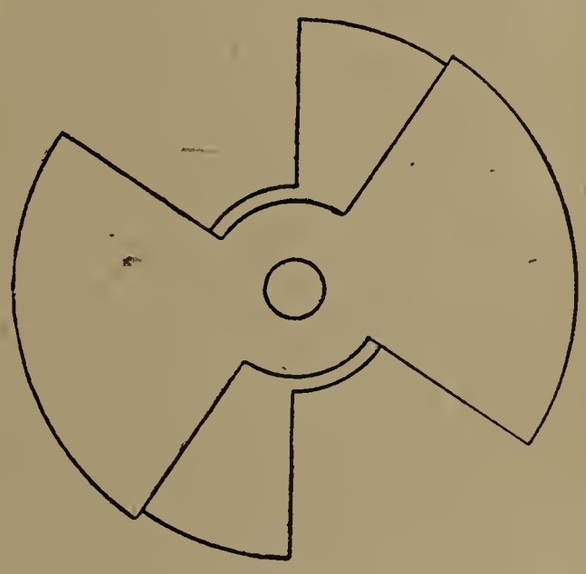


Fig. 228.

269. Expérience de Fechner.

On regarde une surface blanche S. Brusquement on obture l'un des yeux (l'œil droit par exemple) : la surface paraît un peu plus sombre. Du reste l'obscurcissement est très faible, si faible qu'il est insensible pour beaucoup d'observateurs.

On recouvre l'œil droit d'un verre gris; on recommence l'expérience. On obture l'œil droit : *la surface paraît nettement plus claire.*

Il existe évidemment un optimum pour le gris du verre employé : s'il

est trop clair, nous venons de dire que le résultat change de signe ; s'il est trop foncé, il importe peu que l'œil soit recouvert d'un obturateur supplémentaire. On recommande un verre laissant passer environ 5 p. 100 de la lumière incidente. On réalise au mieux l'expérience en plaçant devant l'œil le système de deux disques évidés noircis (fig. 228) qu'on fait tourner ; on modifie leur décalage jusqu'à diminuer la lumière incidente dans le rapport voulu (§ 164).

L'explication du phénomène est dans une erreur de jugement.

Le gris vu par l'œil droit nous paraît faire partie de la couleur de la surface S ; quand nous le supprimons en recouvrant l'œil, il est naturel que la surface s'éclaire.

La preuve qu'il en est ainsi est dans le changement du résultat lorsque nous plaçons devant l'œil droit armé du verre gris, un papier cachant la surface. Quand on ouvre l'œil, le blanc de la surface S augmente un peu. C'est qu'alors la lumière vue par l'œil droit n'est plus localisée sur la surface S : l'erreur de jugement devient impossible.

Cette figure correspond à la page 332.

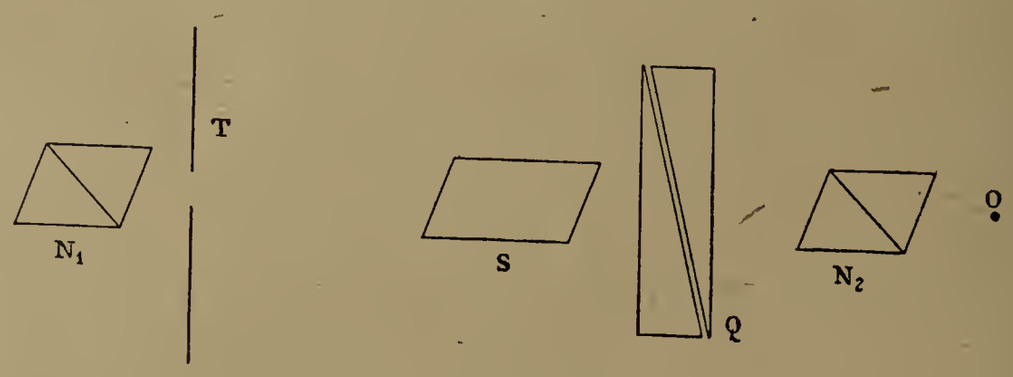


Fig. 213.

PROCÉDÉS DE REPRODUCTION DES FORMES ET DES COULEURS

270. **Remarques préliminaires.**

1° — Dans les chapitres par lesquels débute cette troisième partie, je poursuis deux buts : expliquer au lecteur les opérations générales de la photographie, lui enseigner les lois générales de la photochimie.

Il ne s'agit pour moi d'en faire ni un artiste photographe, ni un technicien des procédés photographiques. Mais je l'engage à répéter les expériences fondamentales, à acquérir ce minimum de doigté dont l'absence est une gêne dans une infinité de cas, en particulier dans les laboratoires.

2° — Le physicien n'a pas les préoccupations du chimiste; il s'inquiète médiocrement du détail des réactions. Les formules perdent pour lui une bonne part de leur intérêt; elles ne lui servent qu'à fixer les idées et à classer les réactions en groupes généraux. A travers leur détail, il cherche la loi qu'il soupçonne être la même dans tous les cas. Il veut savoir suivant quels processus fondamentaux les actions photochimiques se produisent, et non pas comment on appelle les corps qui en résultent. Assurément il ne méprise pas le rôle du chimiste; mais il trouve qu'en divisant le travail, on est mieux à même de le parfaire.

D'autant que la besogne du chimiste est rendue difficile par la petitesse des masses sur lesquelles on opère et le nombre des corps qui interviennent. Ce n'est pas le moindre enseignement que donne la photographie, de forcer à réfléchir sur l'extrême division de la matière et sur l'admirable sensibilité des réactions.

3° — Me plaçant au point de vue de l'éducation générale, je me garderai d'insister sur des recettes qui peut-être fournissent des résultats plus parfaits, mais qui apportent dans un sujet simple une complication fort inutile. En feuilletant les traités de photographie (ils sont légion), on est ahuri de voir successivement recommander des teneurs qui varient de 1 à 10. Le débutant s'effare, au lieu de conclure que la richesse des solutions n'a guère d'importance et qu'il n'y a pas à se gêner.

Par exemple, on conseille de développer les épreuves au charbon dans de l'eau tiède dont la température varie, suivant les auteurs, de 35° à 55°. Conclusion : sans prendre autre chose qu'un thermomètre de douze sous, développez dans de l'eau qui ne soit pas trop chaude.

Même remarque pour des opérations non essentielles. Le débutant ne manque pas après développement d'aluner ses plaques au gélatino-bromure et de les clarifier à l'acide citrique. Si les brochures sur la photographie ne contenaient que l'essentiel, elles se réduiraient à une douzaine de brochures de quelques pages. Pour les remplir, il faut bien indiquer des opérations inutiles quand on ne cherche pas des résultats exceptionnels.

Le lecteur initié ne s'étonnera donc pas des lacunes *voulues*. Le débutant trouvera les opérations si simples qu'il aura la curiosité de les essayer; il réussira sans peine, non certes à créer des chefs-d'œuvre, mais à acquérir une idée précise des manipulations photographiques, en même temps qu'un outil nécessaire au physicien.

CHAPITRE I

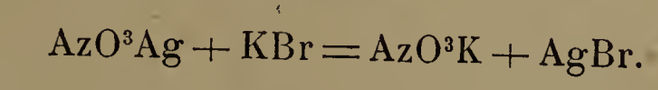
PHOTOGRAPHIE AU GÉLATINOBROMURE D'ARGENT

271. Obtention de l'émulsion.

1° — Réaction in vitro.

On sait que pour reconnaître les solutions des bromures on y verse une solution d'azotate d'argent. On obtient du bromure d'argent par double décomposition.

Avec le bromure de potassium, on a la réaction :



$$AzO^3Ag + KBr = AzO^3K + AgBr.$$

On obtient ainsi un produit blanc jaunâtre, *floconneux*, insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'ammoniaque, très soluble dans l'hyposulfite de sodium ou le cyanure de potassium.

Abandonné à la lumière, il noircit peu à peu.

On vérifiera que 170 grammes (une molécule) d'azotate d'argent exigent 119 grammes de bromure de potassium, 98 grammes de bromure d'ammonium.

On augmente la sensibilité du bromure pour la lumière, en le *mûrissant*, c'est-à-dire en transformant le précipité *floconneux* en un produit *granulaire*. Les grains grossissent de quelques microns à 20 ou 40, quand on traite les flocons par l'eau chaude; la transformation est d'autant plus rapide que l'eau est plus chaude : à l'ébullition elle ne demande qu'une vingtaine de minutes.

2° — Emulsion.

Le bromure d'argent est employé en émulsion dans la gélatine. Nous revenons plus loin (§ 311) sur les propriétés de ce corps. Il nous suffira pour l'instant de savoir qu'il est soluble dans l'eau chaude; par refroidissement les solutions contenant plus de deux ou trois centièmes se prennent en gelée. La gelée se dessèche par évaporation de l'eau et finit par donner un corps dur et cassant. Inversement la gélatine s'imbibe dans l'eau froide sans se dissoudre en quantité notable.

Voici comment on obtient l'émulsion de gélatinobromure : je schématise un peu le procédé.

On prépare les solutions suivantes dans de l'eau à 50°.

Eau distillée 300 gr.	Bromure d'ammonium 18 gr.	Gélatine 12 gr.
Eau distillée 150 gr.	Azotate d'argent 27 gr.	

On éclaire à la lumière rouge; on mélange les solutions; le bromure se forme.

On chauffe 20 minutes à l'ébullition pour grossir les grains.

On ramène à 50°, on dissout 25 grammes de gélatine pour épaissir la solution. On verse dans une cuvette; l'émulsion se prend en gelée par refroidissement.

On divise la gelée avec une passoire faite d'un nouet de canevas; on lave à l'eau froide les filaments obtenus pour chasser les sels solubles en excès. On égoutte.

Dans cet état, il est bon de laisser l'émulsion se reposer une huitaine.

Pour l'utiliser, on la fond au bain-marie dans une espèce de cafetière. On l'étend sur des plaques de verre bien nettoyées et placées horizontalement. Elle prend par refroidissement. On dessèche les couches obtenues en mettant les plaques dans un séchoir que parcourt un courant d'air sec à la température ordinaire; on produit le tirage au moyen d'une lampe ou d'un bec de gaz placé à la partie supérieure du séchoir.

Les couches, telles qu'on les trouve dans le commerce, sont opaques et jaunâtres.

J'indique ces opérations pour fixer les idées. Mais il est préférable d'acheter les plaques toutes préparées; on en trouve ayant suivant l'étiquette des propriétés très diverses et *pratiquement* toujours les mêmes.

272. **Développement des plaques. Procédé à l'oxalate ferreux.**

1° — Laissons une plaque au gélatino-bromure en pleine lumière : elle ne noircit que très lentement ; le noir n'est jamais intense. A plus forte raison quand on l'expose dans une chambre noire (je reviendrai là-dessus plus loin), rien ne distingue les parties insolées de celles qui ne le sont pas. *L'image n'est pas visible*; on dit *qu'elle est latente*. Elle n'apparaît que sous l'action des *révélateurs*.

Les révélateurs (on les compte par centaines) transforment le bromure d'argent en argent métallique *opaque* et en brome qui est éliminé par un procédé quelconque.

Voici la manière d'utiliser les deux principaux révélateurs.

2° — Oxalate ferreux.

C'est le révélateur type des laboratoires et des ateliers parce qu'il est facile de l'obtenir invariable. Les photographes amateurs le méprisent parce que réciproquement il n'est guère possible de modifier son énergie.

On prépare deux solutions :

A.	Eau distillée 1 000 gr.	Oxalate neutre de potasse 300 gr.	
B.	Eau distillée 1 000 gr.	Sulfate ferreux 300 gr.	Acide tartrique 0,5 gr.

On conserve le second flacon au jour pour éviter l'oxydation (§ 310).

Au moment de développer, dans trois volumes de A, on verse un volume de B. Il se forme de l'oxalate ferreux qui se redissout dans l'excès du sel de potassium. La solution est rouge.

On met la plaque insolée dans une cuvette à moitié pleine de solution : on agite en balançant la cuvette. On attend que les noirs apparaissent au dos de la plaque retirée du bain pour cette observation.

On lave alors à grande eau.

On *fixe* en dissolvant l'excès de bromure d'argent dans une solution saturée d'hyposulfite de sodium. On y laisse la plaque jusqu'à ce que toute trace laiteuse ait disparu quand on regarde au dos.

On lave plusieurs heures dans de l'eau plusieurs fois renouvelée (il est absolument inutile que l'eau soit courante). On sèche. Le même bain d'oxalate peut servir à plusieurs plaques développées les unes après les autres. Abandonné dans la cuvette, il précipite bientôt à l'état d'oxalate ferrique.

3° — Revenons sur la théorie du procédé.

L'oxalate de potassium employé, oxalate neutre, $(COOK)^2 + H^2O$, se présente en petits cristaux blancs; on l'obtient en saturant le sel d'oseille (oxalate acide) par le carbonate de potassium. C'est un poison violent. Quand on le dissout dans de l'eau calcaire, il se forme de l'oxalate de calcium insoluble; on sera donc généralement forcé de filtrer la solution A sur un tampon d'ouate.

Corrélativement il faut dissoudre le sulfate de fer dans de l'eau distillée; autrement l'oxalate de calcium se produira lors du mélange.

Le sulfate de fer $SO^4Fe + 7H^2O$ se trouve dans le commerce sous forme de cristaux verts toujours oxydés par place. On commence par les laver et on rejette l'eau jaunie. On dissout les cristaux *à froid*. Pour supprimer ce qui reste de sulfate ferrique, on met dans la solution des bouts de fils de fer et quelques centimètres cubes d'acide sulfurique : l'hydrogène naissant réduit le sulfate ferrique qui donnerait de l'oxalate ferrique jouant le rôle de retardateur.

Pour éviter l'oxydation on conseille d'ajouter un peu d'acide tartrique 5 p. 1000 et de garder le flacon en pleine lumière (§ 310).

L'oxalate ferreux $(COO)^2Fe$ est quasiment insoluble dans l'eau. Mais il est soluble dans un excès d'oxalate de potassium; d'où la nécessité de verser le sulfate ferreux dans l'oxalate de potassium en excès (et non l'oxalate dans le sulfate).

4° — L'oxalate ferreux tend à se transformer en oxalate ferrique avec production d'hydrogène :

$$6(COO)^2Fe + 3H^2O = 2(COO)^6Fe^2 + Fe^2O^3 + 6H;$$

C'est donc un réducteur. Avec le bromure d'argent *insolé*, on admet la réaction :

$$6(COO)^2Fe + 6AgBr = 2(COO)^6Fe^2 + 6Ag + Fe^2Br^6$$

La réduction ne porte que sur le bromure *insolé*. L'image commence à apparaître après 30 secondes; le développement dure de 3 à 5 minutes.

273. **Développement à l'acide pyrogallique.**

1° — L'acide pyrogallique (pyrogallol) est un orthotriphénol de formule :

$$C^6H^3(OH)^3.$$

Il se présente sous forme de masses légères, blanches, cristallines; on le vend parfois en pastilles comprimées.

A l'air il s'oxyde en donnant de l'acide acétique, du gaz carbonique et des matières brunes complexes.

Il est employé dans l'analyse quantitative des mélanges gazeux.

L'oxydation est plus rapide en présence d'alcalis.

Les solutions de pyrogallol sont stabilisées par le sulfite de sodium.

Le sulfite, $SO^3Na^2 + 7H^2O$, se transforme à l'air en sulfate dont la présence est plutôt nuisible aux opérations photographiques. Pour vérifier la pureté toujours relative du sulfite, on traite par HCl qui dégage SO^2. Lorsque le dégagement cesse, on ajoute du chlorure de baryum qui précipite le sulfate.

2° — Le pyrogallol pur n'a pas d'action sur le bromure d'argent exposé ou non à la lumière; additionné d'un alcali, il réduit le bromure d'argent exposé ou non à la lumière : d'où la nécessité de rendre à la fois son action plus énergique au moyen d'un alcali, tout en le modérant de manière qu'il n'agisse que sur le bromure modifié par la lumière.

Partant de là, on utilise pour le développement le pyrogallol en poudre, le sulfite et le carbonate de sodium en solutions séparées et concentrées; on évite ainsi les pesées.

3° — Dans 60 centimètres cubes d'eau, mettez 10 centimètres cubes de la solution de sulfite. Ajoutez une quantité de pyrogallol variable de 0,1 à 0,25 grammes; employez pour cela une cuillière à moutarde en bois ou en os. Versez dans une cuvette, plongez la plaque à développer. La gélatine s'imprègne, rien d'autre ne se produit.

Après 30 secondes, reversez le liquide dans un verre, ajoutez un peu de la solution de carbonate de sodium; agitez; reversez sur la plaque. Après chaque addition de carbonate, regardez l'effet produit.

Si l'image est trop lente à venir, ajoutez à nouveau du carbonate

toujours en reversant dans un verre pour que le bain soit bien homogène. Si l'image vient trop vite, modérez au moyen de quelques gouttes d'une solution de bromure de potassium à 10 p. 100.

S'il faut de la vigueur, ajoutez du pyrogallol.

Quand on doit développer des clichés d'une manière continue, on dissout du pyrogallol dans la solution saturée de sulfite, de manière à avoir 0,25 grammes pour 10 centimètres cubes de solution. Dans ces conditions, le pyrogallol peut rester quelques semaines sans se décomposer d'une manière notable. Mais le procédé le plus simple est encore le premier.

274. **Choix du révélateur.**

Il y a des révélateurs par centaines. Les deux précédents suffisent pour tous les travaux. On n'empêchera pas les gens de se croire plus malins que les autres et de préconiser des formules bizarres; laissons-les faire et ne compliquons rien. L'art du photographe est bien davantage dans le choix du temps de pose que dans le développement. S'il n'y a rien sur la plaque ou si elle est voilée, vous n'y changerez pas grand'chose. Vous n'êtes pas photographe de métier; je vous conseille de recommencer.

Certes le développement ne doit pas être *automatique*; il faut regarder ce qu'on fait. Un bain de composition donnée révèle correctement des plaques ayant des poses assez différentes, puisqu'on peut modifier la durée du développement.

Le révélateur en fer est évidemment moins souple que le révélateur au pyrogallol, puisque avec ce dernier les concentrations en pyrogallol et en carbonate de sodium sont arbitraires, sans parler du modérateur.

Cependant un opérateur *moyen* ne gagne pas énormément à profiter de toutes ces variables; obtenir de bons clichés est encore l'essentiel; le choix du temps de pose a une importance incomparablement plus grande que celle du révélateur.

Quand on veut être sûr d'obtenir quelque chose, il est bon de faire trois clichés avec les poses 1, 2, 4, la pose 2 étant celle que l'on croit bonne.

275. **Fixage.**

On appelle *fixage* la dissolution du bromure non utilisé; le terme est impropre, comme nous allons le voir. On emploie pour cela une solution presque saturée d'hyposulfite de sodium (tétrathionate, $S^2O^3Na^2$).

Il se présente en gros cristaux incolores. Sa solution aqueuse s'altère peu à peu en donnant du soufre, du sulfite et du sulfate.

$$S^2O^3Na^2 = SO^3Na^2 + S, \qquad S^2O^3Na^2 + O = SO^4Na^2 + S;$$

la présence de ces corps est sans inconvénient.

Par double décomposition avec le chlorure, le bromure, l'iodure d'argent, l'hyposulfite donne l'un des sels doubles :

$$S^2O^3NaAg \text{ (soluble)} \qquad (S^2O^3)^3Ag^2Na^4 \text{ (insoluble)}.$$

D'où la nécessité de le prendre en grand excès. On montre aisément l'existence des sels doubles en faisant réagir dans un tube à essai une solution d'hyposulfite sur une solution d'azotate d'argent.

On fixe à l'abri de la lumière en agitant le bain. La lumière facilite la production du sel double insoluble. On continue le fixage jusqu'à ce qu'en regardant au dos, on cesse de voir des traces laiteuses.

On lave ensuite pendant quelques heures en ayant soin de changer l'eau cinq ou six fois. On n'oubliera pas que l'hyposulfite ronge lentement l'argent réduit : il ne faut donc pas prolonger le fixage plus que le temps nécessaire.

Un cliché développé, lavé, *non fixé*, se conserve assez longtemps sans altération notable à une lumière modérée. Ce n'est donc pas tant pour le *fixer* que pour le rendre *transparent* qu'on dissout le bromure en excès.

Le cliché ne pourrait servir à rien tant qu'il reste opaque.

276. **Noir d'un cliché. Mesure thermo-électrique.**

1° — Voici comment on peut définir et mesurer d'une façon rationnelle le noir d'un cliché.

Utilisons un faisceau de lumière auquel nous ne demandons que d'être constant; supposons possible de déterminer son intensité.

Divisons la plaque sensible en deux parties; impressionnons l'une d'elles; développons la plaque entière, fixons et séchons.

Sur le parcours du faisceau lumineux, interposons la partie non impressionnée; soit I_0 l'intensité transmise.

Interposons la partie impressionnée; soit I ($<I_0$) l'intensité transmise.

La mesure du noir est par convention le rapport :

$$N = \frac{I_0 - I}{I_0}.$$

Pour $I = I_0$, $N = 0$; le noir est nul

Pour $I = 0$, $N = 1$; le noir a sa valeur maxima qui est 1 par convention.

L'unité en laquelle on mesure les intensités lumineuses est arbitraire.

Si le cliché développé se conduisait comme une lame absorbante homogène, le noir défini comme il vient d'être dit, dépendrait de la composition du faisceau lumineux auxiliaire, de sa longueur d'onde s'il est monochromatique. Mais l'observation microscopique montre le cliché constitué par des grains opaques, tel un écran percé de trous, ou encore une plaque de verre recouverte de grains de sable. L'opacité des grains étant complète au moins pour toutes les lumières visibles, il

suffit d'utiliser une telle lumière pour que le noir soit indépendant de la composition du faisceau lumineux auxiliaire.

2° — Il est commode de remplacer la mesure photométrique ordinaire par une mesure thermoélectrique. On utilise une pile thermoélectrique sensible et une source de chaleur dont on élimine les radiations les moins réfrangibles : il suffit d'interposer un espace plein d'eau entre la

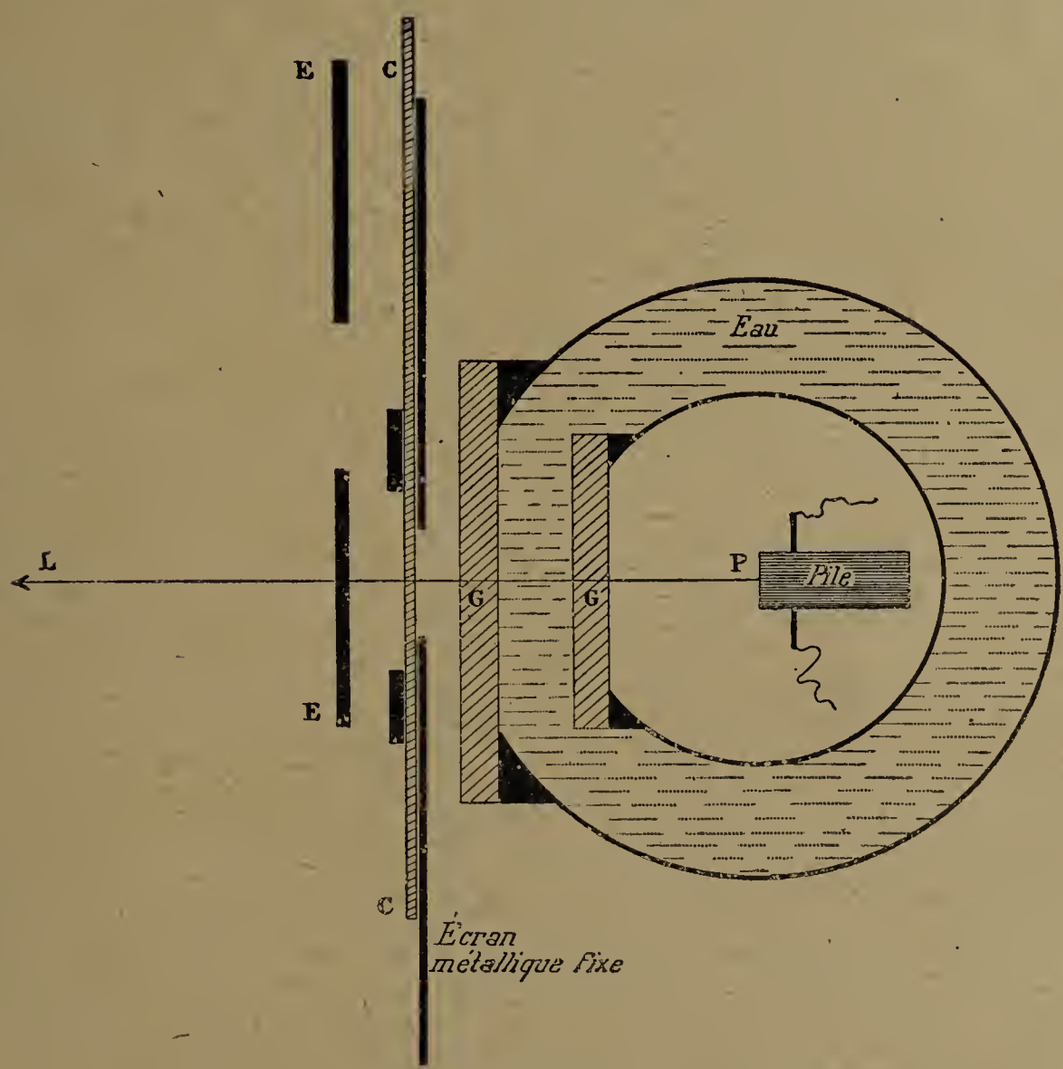


Fig. 229.

source et la pile. Les glaces qui limitent cet espace, sont épaisses pour éliminer l'influence des variations possibles du verre servant de substratum à la couche sensible.

Comme source de chaleur lumineuse, je conseille une lampe à pétrole à mèche circulaire; le niveau du pétrole est maintenu constant par vase de Mariotte.

La pile thermoélectrique (bismuth-antimoine) est disposée dans une double enceinte en fer-blanc composée de deux boîtes cylindriques soudées l'une à l'autre. Dans les parois sont percées deux fenêtres en regard l'une de l'autre, sur lesquelles sont golazées les glaces G. L'intervalle entre les cylindres est plein d'eau, ou parcouru par un lent courant d'eau. Un écran métallique fixe est en avant de la double fenêtre; devant lui se trouve le cliché CC à étudier. La lampe est sur la droite LP à une

distance de l'ordre de 50 centimètres. Une guillotine horizontale mobile EE tirée par un caoutchouc et qu'on manœuvre de loin, permet de découvrir le cliché et la pile, puis de refermer la fenêtre.

On mesure l'intensité des faisceaux calorifiques par la première élongation de l'aiguille d'un galvanomètre balistique. L'aiguille était au repos, on ouvre la fenêtre, on détermine l'élongation maxima, puis on referme aussitôt (§ 152).

Pour réarmer la guillotine, on interpose un écran opaque.

D'une expérience à l'autre, on change la position du cliché; on amène ainsi successivement devant la fenêtre les régions dont on veut comparer les noirs. J'ai employé cette méthode il y a une vingtaine d'années; elle donne des résultats très réguliers; elle est indépendante de la sensibilité de l'œil. L'appareil peut être construit avec ce que renferment habituellement les laboratoires.

3° — On peut lui substituer un photomètre quelconque, par exemple à *œil de chat* (§ 112); mais la sensibilité de l'œil intervient; la précision est bien moindre.

Pour la comparaison des noirs les photographes utilisent des méthodes sans signification précise; par exemple, ils réalisent à l'encre de Chine une échelle de noirs aux termes de laquelle ils comparent le noir du cliché.

Le noir ne peut être correctement défini qu'à l'aide d'un photomètre quel qu'il soit. Je reviendrai plus loin sur d'autres définitions numériques possibles (§ 370).

277. **Classification des plaques. Plaques ortho et panchromatiques.**

On classe les plaques à deux points de vue : suivant leur sensibilité pour une radiation déterminée, suivant leurs sensibilités relatives pour les diverses radiations.

1° — Plaques ordinaires.

Les plaques ordinaires sont de sensibilités très variables suivant le mode de fabrication. Généralement les grains sont d'autant plus gros que la sensibilité est plus grande; cependant on fabrique aujourd'hui des plaques ultra-sensibles à grains petits.

Chaque fois que le genre de travail le permet, il faut employer des plaques lentes; on évite ainsi maintes causes de voile. Des précautions minutieuses ne sont plus nécessaires pendant les manipulations, en particulier pendant le développement.

Au surplus ces plaques ont le grain fin et sont plus homogènes.

Pour fixer les idées, non certes sur la réalité, mais sur ce qu'annoncent les fabricants, voici les sensibilités des cinq marques de l'un d'eux.

Il les désigne par les lettres de l'alphabet :

noms	A	B	C	D	E
sensibilités	1	3	15	45	105

En vertu des faits que nous verrons plus loin, un tel classement numérique n'a pas de sens précis (§ 359).

La sensibilité des plaques est très variable avec la longueur d'onde des radiations employées. Photographions un spectre *normal* pur obtenu à partir d'une lumière blanche (§ 120). Pour chaque temps de pose et chaque intensité, nous pouvons construire une courbe en portant en abscisses les longueurs d'onde et en ordonnées les noirs corres-

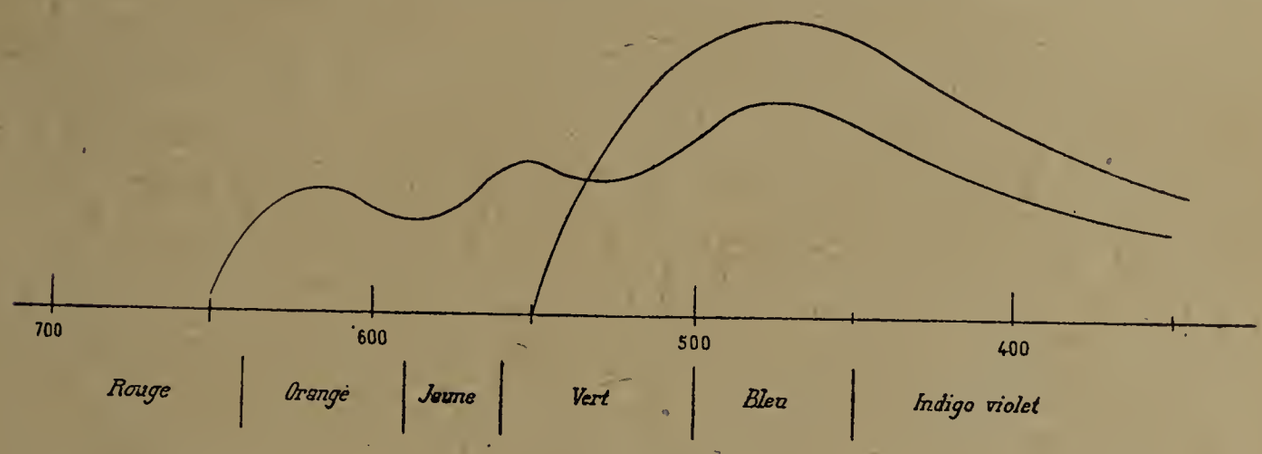


Fig. 230.

pondants; la figure 230 représente *schématiquement* les résultats. Pour les plaques ordinaires au gélatinobromure, la courbe se détache de l'axe des abscisses pour les radiations dont les λ sont inférieurs à $0^{\mu},55$, s'élève rapidement quand λ décroît, présente un maximum au voisinage de $\lambda = 0^{\mu},47$, et se rapproche lentement de l'axe des abscisses.

La forme varie d'ailleurs beaucoup suivant les procédés de fabrication.

Les rouges, orangés et jaunes ne produisent donc aucun effet.

D'où la possibilité de développer en s'éclairant avec du rouge obtenu par transmission à travers un verre coloré. Les verres rouges laissant ordinairement passer les violets, pour plus de sécurité on leur superpose un verre jaune.

2° — La détermination rationnelle de la sensibilité des plaques exige l'obtention d'un éclairement connu en valeur absolue et la mesure d'un noir, après développement dans des conditions bien déterminées.

On utilise, par exemple, une lampe Carcel (§ 140) qu'on fait agir un temps connu sur le cliché placé à une distance connue; on fixe ainsi en unités absolues les conditions d'exposition. On développe au fer (c'est le révélateur qu'on réalise le plus aisément semblable à lui-même) pendant cinq minutes par exemple: on détermine le noir.

Nous verrons plus loin (§ 359) quelles difficultés insurmontables les lois photochimiques opposent à la détermination en nombres absolus de la sensibilité des plaques, et pourquoi les indications fournies par les fabricants ne signifient rien, sinon comme vague renseignement à l'usage des amateurs.

3° — Plaques ortho et panchromatiques.

L'expérience montre qu'en plongeant les plaques ordinaires dans des

solutions d'éosine, de fluorescéine, de fuchsine, de violet de méthyle, de vert malachite, de bleu d'aniline, etc., etc., autant dire dans une solution colorée organique quelconque, on modifie les sensibilités relatives pour les diverses radiations.

Le maximum de sensibilité restant toujours dans le bleu, on rend la plaque plus ou moins sensible pour le rouge et l'orangé. Au surplus la courbe des sensibilités présente toujours des oscillations notables et très variables suivant le sensibilisateur (voir la courbe ondulée de la figure 230).

Les plaques ainsi modifiées s'appellent ortho-iso-panchromatiques, on n'a jamais su pourquoi, puisqu'elles sont si loin d'avoir pour les diverses radiations des sensibilités relatives comparables à celles de la rétine que, pour conserver vaguement aux couleurs leurs importances relatives, il est indispensable de photographier *à travers un verre jaune* diminuant l'action de la partie la plus réfrangible du spectre. On le place contre l'objectif dans la chambre noire.

Ces plaques sont indispensables pour obtenir des paysages qui ne soient pas horribles. Pour les plaques ordinaires insensibles aux jaunes, tous les verts ont même valeur; les prairies et les forêts se fondent dans le même plat d'épinard. Les plaques ortho-iso-panchromatiques, grâce au jaune qu'elles font intervenir, séparent les verts les uns des autres.

On a d'abord énoncé une loi d'apparence simple touchant l'action des sensibilisateurs colorés : *une matière sensibilise pour les rayons qu'elle absorbe*. Cette loi est du type des lois sonores qui ne signifient rien. L'expérience montre qu'une matière peut absorber certaines radiations sans rendre la plaque sensible pour elles. Il faudrait donc se contenter de l'énoncé plus modeste : *une matière ne sensibilise que pour une partie des rayons qu'elle absorbe*, énoncé qui est évident *a priori* et laisse la marge à toutes les incertitudes.

On pourrait cependant lui chercher un intérêt en mesurant les coefficients d'absorption des matières colorées et les comparant aux sensibilités; malheureusement nous verrons qu'il est impossible de définir les sensibilités par UN nombre. Je demande donc sur quoi porterait la comparaison numérique.

Malheureusement c'est par de telles lois qu'on devient célèbre auprès des imbéciles; elles rentrent dans la catégorie des grandes idées que je ne cesse pas de trouver saugrenues.

Les plaques isochromatiques étant impressionnées à travers un verre jaune exigent une pose considérable.

Vu la sensibilité plus uniforme des plaques, il est bon dans l'agencement du laboratoire de se méfier des verres rouges ordinaires et de développer dans une quasi-obscurité.

278. **Papiers au gélatinobromure. Pellicules.**

1° — Dans ce qui précède nous supposons qu'on choisit le verre

comme substratum de la couche sensible. Rien n'empêche de prendre le papier. On trouve dans le commerce des pochettes ou des rouleaux de papier à grains plus ou moins gros, qu'on expose et qu'on développe comme les plaques ordinaires. Les rouleaux ont une longueur de $2^m,50$ à 10 mètres sur une largeur de 11 à 130 centimètres.

Ils sont très commodes pour certains enregistrements.

Les papiers servent aux agrandissements.

Ils ont l'avantage de pouvoir être impressionnés *mouillés*. On applique dans l'eau la feuille contre le cliché à reproduire, cliché bien lavé mais que par hypothèse on n'a pas le temps de sécher. On enlève l'excès d'eau avec un râteau sans dents, on essuie le verre avec du buvard, on expose, on détache le papier du cliché *sous l'eau* et l'on développe.

D'où un gain de temps qui peut être utile.

Le fer est un révélateur excellent, surtout additionné d'acide citrique.

2° — Le papier au gélatinobromure *qui est opaque*, ne peut fournir un négatif transformable en positif par contact, puisque dans cette opération la lumière agit par transparence. On rend le papier transparent en le *cirant*, c'est-à-dire en le passant dans un bain de cire vierge chaude ou de paraffine; mais sa transparence est imparfaite; de plus il casse par pliage.

Le support transparent et souple par excellence est le celluloïd.

On fabrique avec lui les rouleaux sensibles utilisés dans les appareils genre Kodack et dans les cinéma (*films*).

Le celluloïd est du coton poudre dans lequel on incorpore du camphre. Pour faire des pellicules, on le dissout dans l'acétate d'amyle, on l'étend de manière que le solvant s'évapore. On obtient ainsi des couches flexibles, résistantes et transparentes, qu'on recouvre d'abord d'une solution de gélatine (pour augmenter l'adhérence), puis de l'émulsion de gélatinobromure d'argent.

279. Impression de la plaque sensible.

1° — Emploi de l'objectif. Phototypes.

Ordinairement la plaque est impressionnée en formant dessus l'image réelle de l'objet à reproduire; on utilise un objectif photographique.

Je renvoie à mes Cours d'*Optique Géométrique* ou de *Construction des appareils* pour l'étude des diaphragmes, des clartés.... Il est clair que plus l'image est grande, plus le diaphragme est petit, plus la pose doit être longue.

Tout ce qu'on raconte en plus est certainement intéressant, mais pas au point de vue pratique.

Certains ouvrages donnent des coefficients de luminosité d'un ineffable grotesque. Les *nuages* ayant le coefficient 1, sachez que les *fonds de ravins ombragés* ont le coefficient 26. De même Tartarin compte 3

avant de tirer le perdreau, et 14 avant de lâcher son coup de fusil sur le lion.

Si vous faites souvent de la photographie et si vous êtes bon observateur, vous ne vous tromperez que la moitié du temps ; sinon, achetez des cartes postales : c'est plus sûr, moins coûteux et moins encombrant.

Dans le cas précédent on obtient un *négatif*; c'est dire que les clairs viennent en sombre et inversement. Pour préciser, imaginons tout l'objet de même teinte; le noir du cliché (§ 276) varie dans le même sens que l'éclat des points dans la direction de l'objectif. C'est tout ce que nous pouvons dire. Nous verrons qu'il n'existe aucune proportionnalité entre l'éclat de l'objet et le noir de l'image. Il peut même arriver, pour des éclats considérables, que le noir rétrograde (*renversement*).

Si l'objet n'est pas partout de même teinte, la définition du négatif est encore plus vague en raison de la sensibilité variable avec la longueur d'onde.

La transposition des valeurs par la plaque photographique est telle qu'on peut s'arranger de manière qu'il soit impossible de savoir par l'observation d'un cliché si c'est un positif ou un négatif. Ainsi les rouges éclatants ne viennent pas; le ruban de la Légion d'honneur tranche mal sur la redingote, tandis qu'éclate l'humble violette. En conséquence les photographes avisés possèdent un lot de décorations actiniques grand format pour la joie du pharmacien Homais, des pontifes, et plus généralement des imbéciles.

On désigne parfois sous le nom de *phototypes* les clichés obtenus avec l'objectif; ce sont des *négatifs*.

2° — Impression par contact.

Le second mode d'impression est *par contact*.

On applique sur la couche sensible une feuille dont les parties sont plus ou moins transparentes et à travers laquelle on impressionne.

Par exemple on dessine à l'encre *opaque pour les rayons actiniques* sur du papier transparent (papier calque). On conseille d'ajouter à l'encre de Chine quelques gouttes d'une solution concentrée de bichromate de potassium, de la terre de Sienne brûlée ou de l'acide picrique : on la rend ainsi plus opaque pour les radiations qui ne sont pas jaunes.

Toute impression typographique ou lithographique sur papier translucide peut servir de cliché reproductible en négatif par contact.

Corot et les peintres de son temps s'amusaient à dessiner à la pointe sur une couche opaque, étendue sur verre, couche analogue au gélatino-bromure de nos plaques sensibles modernes. De ces dessins, on tire des épreuves par contact sur papier ou sur plaque.

On peut se servir d'un phototype négatif pour obtenir un positif sur verre (*diapositif*).

Les spectres magnétiques de mon Cours d'Électricité ont été réalisés directement sur la couche sensible d'une plaque photographique qu'on

impressionnait comme nous allons le dire. La limaille de fer était enlevée avec un tampon d'ouate avant le développement.

Tous ces procédés créent des écrans opaques en quasi-contact avec la couche sensible.

Pour impressionner on se sert de la lumière diffuse du jour quand le contact des écrans et de la couche sensible est assez intime pour qu'on n'ait pas à craindre les pénombres. Dans le cas contraire on utilise une source de petites dimensions et assez éloignée; une lampe à incandescence placée à quelques mètres au-dessous d'une table est très commode comme s'allumant et s'éteignant à volonté.

Pour donner un flou que certains trouvent artistique, on utilise parfois la lumière diffuse en retournant systématiquement le cliché négatif à reproduire, plus généralement en écartant le dessin opaque de la couche sensible. On produit ainsi des pénombres; on supprime la *sécheresse* des traits.

280. Images renversées, retournées. Images inversées.

Nous rencontrons ici des notions fondamentales qui se ramènent aux théorèmes élémentaires sur la symétrie des figures *planes* : j'insiste sur ce dernier mot, les propositions n'étant pas exactement les mêmes pour les *solides*.

1° — Figures renversées, symétrie par rapport a un point.

Soit T un petit trou ou le centre optique d'un objectif. De la figure contenue dans le plan de front P, ils donnent une image dans le plan de front P'. Cette image vue de V_3 est semblable à l'objet et *renversée*.

Renversée signifie que ce qui est en haut sur l'objet vu de V_1, est en bas sur l'image vue de V_3, et inversement; ce qui est à droite sur l'objet est à gauche sur l'image, et inversement.

On passe géométriquement de l'objet P à l'image P' par deux opérations consécutives : symétrie par rapport au point T; grandissement ou diminution ultérieurs.

Pour voir l'image du point V_3 semblable à l'objet regardé du point V_1, il suffit de faire tourner l'image de 180° autour de la droite V_1V_3.

Par exemple les objets vus dans un viseur sont renversés. Pour lire un texte avec le viseur, il suffit de mettre en bas le haut du livre. De même quand nous mettons au point le verre dépoli de la chambre photographique (en nous plaçant bien entendu derrière ce verre), nous voyons les images semblables aux objets mais renversées.

2° — Figures retournées, figures redressées.

Une figure est *retournée* quand nous la regardons *à l'envers*; par exemple, quand nous observons l'image obtenue sur le plan P' en nous plaçant en V_2, quand nous regardons un texte par transparence, enfin quand nous regardons un objet par réflexion sur un miroir.

Pour les figures *planes*, le retournement équivaut à la symétrie par rapport à une droite du plan de la figure; ce que montre la figure 231 en

bas et à gauche. Pour les figures planes, cette symétrie revient encore à une rotation de 180° autour d'une droite du plan (et non plus normale au plan comme tout à l'heure). Nous superposons la figure *abcd* à la figure ABCD en pliant le papier suivant la droite π.

Les impressions, quelles qu'elles soient, donnent évidemment des figures retournées : les caractères d'imprimerie sont coulés *à l'envers*; il faut écrire *à l'envers* sur une pierre lithographique (§ 404).

Les phototypes, obtenus avec une plaque impressionnée *gélatine en*

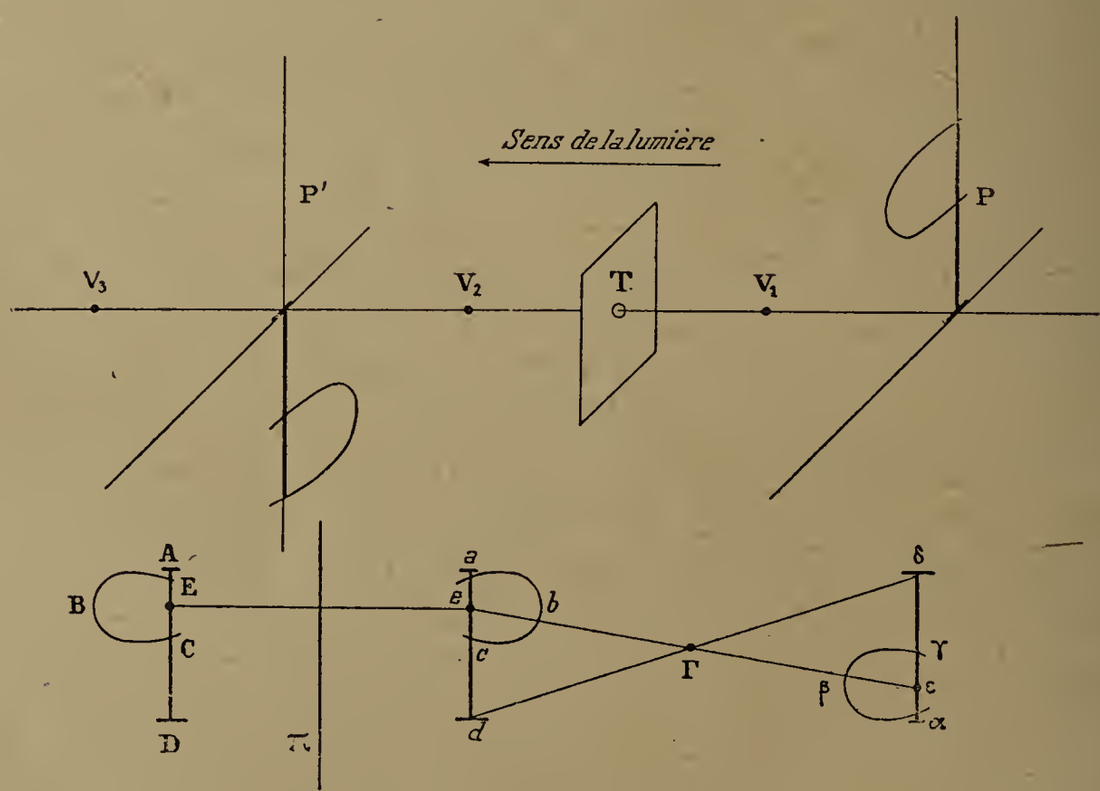


Fig. 231.

avant, sont retournés pour l'observateur qui les regarde *gélatine du côté de l'œil*. Ils redeviennent corrects si on impressionne *verre en avant* et si on regarde *gélatine du côté de l'œil*, ou inversement.

3° — Images positives, négatives, inversées.

Nous avons vu que le phototype est un négatif de l'objet : nous disons que l'image est *inversée*.

Un négatif du phototype est un positif par double inversion.

En général nous désirons obtenir à la fin de nos opérations un dessin qui soit positif et droit. Comme il est impossible de ne pas avoir des inversions et des retournements au cours des opérations, nous devrons réaliser un nombre pair d'inversions et de retournements.

On remarquera que les procédés d'impression, quels qu'ils soient, donnent des épreuves non inversées; autrement dit, là où la surface imprimante est noire, l'épreuve est noire. Quand donc il s'agit de préparer une surface pour l'impression, il faut réaliser un dessin retourné et positif.

281. Obtention de négatifs redressés.

Le cliché est supposé regardé *gélatine du côté de l'œil*. Nous savons que le phototype normal (impressionné gélatine en avant) est un *négatif retourné*.

1° — Impression glace en avant.

Pour avoir un négatif redressé, on peut impressionner *glace en avant*. Le procédé présente deux graves inconvénients : le substratum des couches sensibles ordinaires est en verre médiocre qui déforme les images; la mise au point doit être faite à travers une plaque de même épaisseur.

La méthode n'est donc admissible que pour des couches sensibles déposées sur *glace* (voir mon Cours sur *la Construction...*), ce qui permet d'avoir une épaisseur déterminée, une matière homogène, des faces planes et parallèles.

Avec le collodion, une nouvelle difficulté se présente : il ne faut pas toucher la couche qui est humide; d'où la nécessité d'une chambre noire de construction spéciale.

2° — Emploi d'un miroir ou d'un prisme.

Nous montrons au paragraphe précédent que l'image d'un objet dans un miroir est retournée. D'où l'emploi d'un miroir pour redresser le négatif. Il doit être bien plan et argenté sur sa face *antérieure* (fig. 232).

On peut remplacer le miroir par un prisme à réflexion totale; mais le procédé n'est admissible que pour des champs d'angles petits (de l'ordre de 20°); autrement le prisme est trop coûteux et la réflexion n'est pas partout totale (voir mon Cours sur *la Construction*).

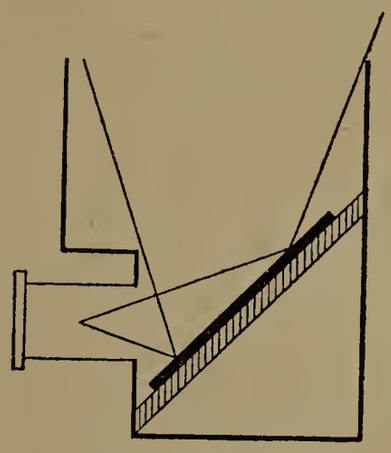


Fig. 232.

3° — Redressement par retournement.

a) Le phototype (négatif retourné) donne un positif redressé (appelé *diapositif* pour rappeler qu'il est transparent) quand on l'utilise pour impressionner une seconde plaque par contact (§ 279) *en accolant les gélatines*.

Si pour une raison quelconque on désire un diapositif retourné, on impressionne par contact en accolant le verre du phototype à la gélatine du futur diapositif. L'inconvénient est dans les pénombres : il n'y a plus contact intime entre le cliché à reproduire et la nouvelle couche sensible. Il faut avoir le soin d'utiliser pour l'impression une source de petites dimensions et assez éloignée.

Au surplus les pénombres donnent un *flou* que certains considèrent comme artistique : ce sont là des choses mystérieuses qu'on ne discute pas.

L'inconvénient est moindre quand le cliché à reproduire est sur *pellicule*, c'est-à-dire quand, au lieu de verre, on emploie comme substratum de la couche sensible une feuille mince de gélatine ou de celluloïd.

b) Parfois on retourne la couche sensible. On la décolle de son substratum, on la retourne et on la recolle sur un autre substratum.

Les ouvrages spéciaux donnent des recettes pour décoller les couches ordinaires à la gélatine ; l'opération est difficile et chanceuse : nous insisterons d'autant moins qu'on trouve dans le commerce des plaques spécialement préparées pour rendre le décollement facile.

282. **Renversement de l'image. Obtention d'un positif direct.**

1° — Le procédé suivant est d'une exécution facile et donne d'excellents résultats.

Le négatif réalisé par les procédés habituels, est développé par exemple au fer, lavé, *mais non fixé*. Le procédé consiste à obtenir un second cliché en utilisant le sel d'argent qui reste sur la plaque et en prenant comme phototype négatif celui qu'on vient de développer. En définitive on obtient un contre-type par contact, le négatif et le positif se trouvent superposés dans la même couche.

Le cliché non fixé placé horizontalement glace en dessous sur une surface noire, est impressionné par une source lumineuse placée au-dessus. L'argent réduit fait écran ; le bromure sous-jacent reste inattaqué.

On refait l'obscurité. L'argent réduit par le premier développement est dissout dans le bain :

Eau	Bichromate de potassium	Acide sulfurique
200 gr.	1 gr.	20 gouttes.

Après dissolution complète, on passe le cliché dans une solution étendue de sulfite de soude pour supprimer le reste de bichromate ; on lave. Enfin on développe et on fixe à la manière ordinaire.

Il est bon que le premier négatif soit un peu trop posé et développé.

Le bain ci-dessus indiqué sert quand on veut éclaircir un cliché, supprimer un voile général.

2° — La méthode suivante fournit des contre-types positifs par contact. Elle repose sur les propriétés de la gélatine bichromatée (§ 312).

On plonge la plaque pendant 3 minutes dans une solution de bichromate de potassium à 2,5 p. 100 renfermant le tiers de son volume d'alcool. L'opération s'effectue à la lumière d'une lampe. On fait sécher dans l'obscurité. (Le bromure de la plaque est donc entièrement insolé ; si on lavait pour chasser le bichromate et si on développait, la plaque serait uniformément noire).

On expose alors *un temps notable* sous le cliché qu'on veut reproduire *sans inversion*. La gélatine devient imperméable dans les parties insolées. On lave un quart d'heure dans l'obscurité pour imbiber la couche et chasser le bichromate ; on développe au fer. Le révélateur passe d'autant plus vite que la gélatine est restée plus perméable, c'est-à-dire qu'elle a été moins impressionnée. A la vérité le bromure est partout insolé ; mais il n'est atteint par le révélateur qu'autant que

celui-ci peut traverser la gélatine. Les noirs de la couche reproduisent donc les noirs du cliché à reproduire, noirs qui servaient d'écrans protecteurs pour la gélatine.

Quand le développement est convenable, on lave et on fixe. Si l'exposition sous le cliché à reproduire est insuffisante, la gélatine est partout perméable, le révélateur agit partout : la plaque est uniformément noire. Si l'exposition est exagérée, la gélatine est partout imperméable : rien ne vient.

On comparera cette méthode à la méthode de photogravure du § 386.

283. **Renforcement.**

Le renforcement est l'opération par laquelle on augmente l'opacité du cliché. Cette définition exige tout un commentaire.

1° — Le cas idéal, qui n'est assurément pas réalisé, est celui d'une couche dont le coefficient d'absorption α pour une radiation déterminée est constant, et dont l'épaisseur ε est variable.

De l'intensité incidente I_0, elle transmet une fraction :

$$I = I_0 \exp(-\alpha\varepsilon).$$

Conservons les épaisseurs mais rendons la couche plus absorbante : le coefficient d'absorption devient $\alpha' > \alpha$; on a :

$$i = I_0 \exp(-\alpha'\varepsilon), \qquad \frac{I}{i} = \exp[(\alpha' - \alpha)\varepsilon].$$

Ainsi l'opacité du cliché n'est pas uniformément augmentée, le rapport $I : i$ n'est pas le même en tous les points de la plaque. En vertu de l'inégalité $\alpha' > \alpha$, il est plus grand là où l'épaisseur est plus grande.

Là-dessus on est tenté de dire que les contrastes sont exagérés. C'est beaucoup s'avancer; la conclusion dépend absolument de la définition choisie pour le *contraste*. La comparaison suivante montre à quel point le résultat dépend des conditions initiales.

Si l'atmosphère est parfaitement transparente, la perspective aérienne (§ 266) disparaît; les fonds et les premiers plans sont également nets. J'introduis un peu de brouillard : tout le monde admet que les contrastes sont exagérés. Je force le brouillard jusqu'à le rendre *londonien*; dira-t-on encore que les contrastes sont exagérés?

De même on peut admettre que les contrastes sont augmentés dans les parties claires de la couche, mais non dans les plus noires.

2° — Au surplus ce qui précède n'a d'intérêt que pour fixer les idées, tant une couche développée est loin d'être assimilable à une couche homogène. Elle est bien plus comparable à de petits écrans parfaitement opaques, plus ou moins gros, irrégulièrement disséminés.

Il est clair que la transformation de ces écrans opaques en d'autres écrans opaques de même grosseur n'a pas d'intérêt, l'aire totale transparente restant la même. Le renforcement ne peut provenir que de deux causes : les écrans ne sont pas parfaitement opaques; ils devien-

nent plus gros ou plus nombreux. Je crois que c'est à la seconde de ces causes qu'il faut attribuer le renforcement réel.

Je n'irai pas plus loin dans l'analyse du phénomène faute de données expérimentales. Au lieu de bâtir des théories *a priori*, il serait préférable d'instituer des expériences systématiques sur l'action réelle des renforçateurs, de voir si les grains restent de même forme et à la même place, s'ils sont plus gros, s'ils sont parfaitement opaques..., renseignements qui ne demanderaient qu'un peu de patience.

3° — Renforcement au chlorure mercurique (bichlorure, $HgCl^2$).

La plaque, fixée et soigneusement lavée, est plongée dans un bain de sublimé à 2 p. 100.

Il se forme du chlorure d'argent et du chlorure mercureux :

$$HgCl^2 + Ag = HgCl + AgCl.$$

Cette opération *blanchit* le cliché.

On lave abondamment et on renoircit par l'un des procédés suivants

a) On plonge dans une solution diluée d'ammoniaque qui dissout le chlorure d'argent, mais donne avec le chlorure mercureux un composé ammoniacal très opaque :

$$2HgCl + 2AzH^3 = AzH^4Cl + AzH^2 . Hg^2 . Cl.$$

b) On traite par une solution de sulfite de sodium qui dissout le chlorure d'argent, mais dépose du mercure :

$$2HgCl + SO^3Na^2 + H^2O = 2Hg + SO^4Na^2 + 2HCl.$$

c) On développe au fer. Les deux chlorures sont réduits avec formation de perchlorure de fer et d'acétate ferrique :

$$6(COO)^2Fe + 6MCl = 2(COO)^3Fe^2 + 6M + Fe^2Cl^6.$$

284. **Affaiblissement.**

Quand le négatif est empâté, on redissout une partie de l'argent précipité.

a) On traite par une solution de cyanure de potassium.

Il se forme du cyanure d'argent soluble dans le cyanure de potassium.

On arrête quand on juge atteint le résultat cherché.

b) On traite par une solution de perchlorure ferrique; l'argent passe à l'état de chlorure. Quand l'action est suffisante, on lave et on traite par l'hyposulfite de sodium qui dissout le chlorure.

c) Au moyen du perchlorure de fer, on transforme tout l'argent en chlorure; on lave et on recommence le développement.

On fixe à la manière ordinaire.

d) Au lieu de perchlorure de fer, on utilise le bichlorure de cuivre :

$$Ag^2 + 2CuCl^2 = 2AgCl + Cu^2Cl^2.$$

Quand l'effet désiré est obtenu, on lave; on dissout le chlorure d'argent dans l'hyposulfite. On peut encore opérer comme au *c*).

A la place de bichlorure de cuivre, on peut utiliser le mélange :

Eau	Sulfate de cuivre	Sel de cuisine
100 gr.	5 gr.	5 à 15 gr.

e) On traite par l'acide chromique qui donne un chromate soluble. En fait on emploie la solution (comparer au § 282).

Eau	Bichromate de potassium	Acide sulfurique
1 000 gr.	1 gr.	1 cm³.

285. **Pelliculage.**

1° — On appelle *pelliculage* la séparation de la couche sensible (gélatinobromure, collodion) de son substratum.

Pour le gélatinobromure on utilise le formol qui durcit la gélatine.

Le formol (aldéhyde formique, CH^2O) est un gaz.

Le formol du commerce, solution aqueuse à 40 p. 100 de ce gaz, est incolore, d'odeur piquante, de réaction légèrement acide.

Le cliché est révélé, fixé et lavé. On le traite pendant 3 minutes par une solution à 4 p. 100 de formol dans l'eau (on mélange 9 volumes d'eau à 1 volume de la solution de formol du commerce). On coupe la gélatine à 1 ou 2 millimètres des bords. On plonge le cliché dans de l'acide chlorhydrique étendu. La pellicule se détache.

On peut encore traiter le cliché par de l'eau à 50° : la pellicule se soulève; on l'arrache sans difficulté. Elle est devenue plus petite, mais elle reprend ses dimensions premières par refroidissement.

La gélatine ne se dissout pas dans l'eau à 50° en raison de son tannage par le formol.

2° — Lorsqu'il s'agit du *collodion humide* (voir plus loin) on talque la glace avant de la collodionner, ce qui diminue l'adhérence. La couche de collodion étant trop mince pour supporter le pelliculage, on coule à la surface du cliché révélé, fixé et lavé, une couche de caoutchouc dissous dans la benzine (caoutchouc non vulcanisé, 2 grammes; benzine, 100 centimètres cubes). On la recouvre quand elle est sèche, d'une nouvelle couche de collodion qui donne l'épaisseur suffisante. On incise à 1 ou 2 millimètres du bord : la pellicule se détache.

3° — Pour donner à la pellicule de gélatinobromure, une grande résistance, on peut l'insérer entre deux couches de collodion caoutchouté. On emploie pour substratum provisoire une glace talquée recouverte d'une couche de collodion, puis d'une couche de caoutchouc. Le cliché à pelliculer est plongé dans le formol, rincé; la gélatine, détachée par un des procédés ci-dessus décrits, est étendue sous l'eau et appliquée contre le support provisoire. On la sort, on la sèche. On la détache aisément, après l'avoir au besoin renforcée d'une seconde couche de caoutchouc et ensuite de collodion.

286. **Halo photographique. Plaques antihalo.**

1° — Quand on photographie un point lumineux brillant dont l'image

se forme en A (fig. 235), la plaque est impressionnée non seulement au point A, mais encore à des distances considérables de ce point.

Le voile *faible au voisinage de l'image* A, passe par un brusque maximum sur une couronne dont le diamètre DD est environ quatre fois l'épaisseur $e = \overline{AB}$ de la plaque; il décroît ensuite lentement. On observe donc comme une sorte de *halo*. La forme circulaire et le diamètre du halo sont indépendants de l'obliquité de la plaque relati-

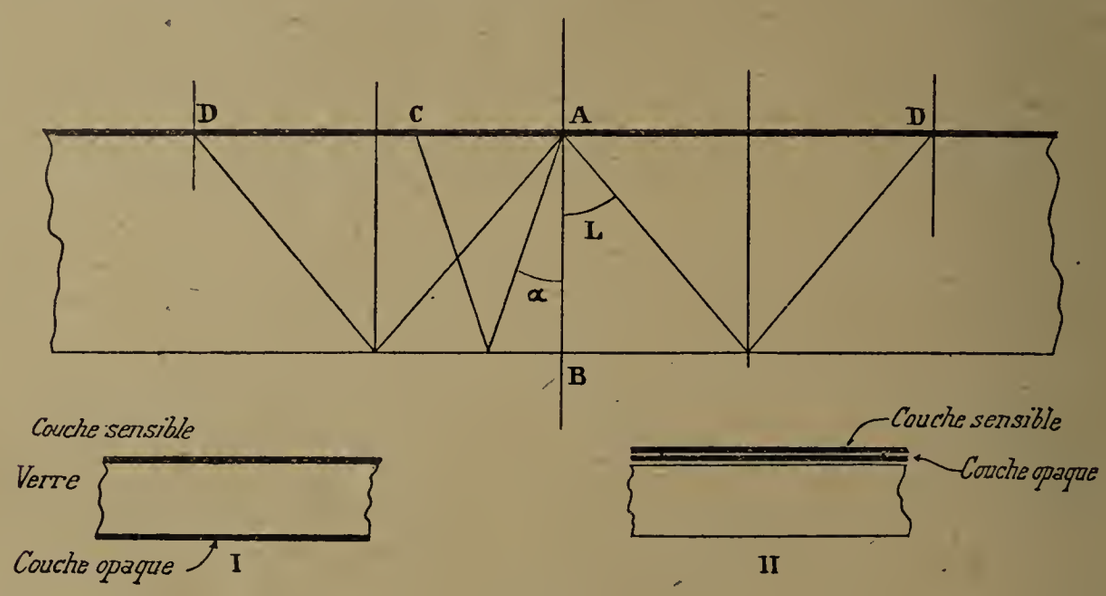


Fig. 233.

vement à l'axe du faisceau incident. La gélatine peut être tournée vers la source ou dans le sens opposé sans que le phénomène soit modifié.

L'explication du halo est simple. La couche d'émulsion est un diffuseur *orthotrope* (§ 155), ce qui explique que le phénomène soit indépendant de l'obliquité. La lumière que l'émulsion diffuse par transmission ou réflexion (suivant qu'elle est en avant ou en arrière), se réfléchit sur la seconde face et revient impressionner la couche sensible.

Le rayon diffusé sous l'angle α la touche à une distance $\overline{AC} = r = 2 \operatorname{tg}\alpha$, du point A. Tant que α est petit, la réflexion sur la seconde face n'est pas totale. Quand la condition :

$$n \sin \alpha = 1, \qquad r = \frac{2e}{\sqrt{n^2 - 1}}, \tag{1}$$

est satisfaite, il y a réflexion totale. Les rayons réfléchis augmentent brusquement d'intensité et produisent le halo. Quand α croît ensuite jusqu'à 90°, la diffusion étant de plus en plus oblique, l'action décroît.

Pour $n = 1{,}5$, la condition (1) donne $2r = 3{,}56.e$.

Le diamètre du halo est donc voisin de quatre fois l'épaisseur de la plaque.

2° — Pour supprimer le halo, on supprime la réflexion sur la seconde face par un enduit noir ayant sensiblement l'indice du verre. On la

recouvre par exemple d'un mélange d'huile et de noir de fumée qu'on a évidemment le soin d'essuyer avant le développement.

Certaines plaques portent au dos une pellicule détachable à sec, qu'on arrache avant le développement (fig. 233, I).

On peut encore interposer entre le verre et la couche sensible une couche de gélatine teintée en rouge orangé, imperméable aux radiations actives et pouvant être aisément décolorée soit par le développement, soit après développement; sans quoi elle s'opposerait à l'obtention des positifs (fig. 233, II).

287. **Irradiation photographique.**

1° — L'expérience montre que si l'on photographie des objets *très lumineux*, la plaque sensible donne leurs images *agrandies*.

Il y a empiétement des clairs sur les noirs. Le fait n'est pas contestable, seule l'explication du fait est matière à discussion.

L'expérience consiste à photographier deux bandes lumineuses parallèles, uniformément éclairées, séparées par une bande obscure. Sur le cliché, les images correctes devraient avoir les largeurs l et l'; la largeur de la bande devrait être e. On trouve au contraire des largeurs $l+2\lambda$, $l'+2\lambda$, $e-2\lambda$, l'accroissement de largeur des images lumineuses amène en effet une diminution égale de la bande qui les sépare.

On trouve que, pour de grandes intensités, λ est de l'ordre du dixième de millimètre; λ croît régulièrement avec l'intensité, avec le temps de pose, avec la sensibilité de la plaque.

Ces résultats pourraient être la conséquence d'un *cheminement* de l'action chimique, d'une *irradiation* proprement dite. Mais une autre explication, sinon de la totalité, au moins d'une partie du phénomène est imposée par le fait que l'ouverture de l'objectif influe notablement sur sa grandeur : λ croît quand on diminue l'ouverture de l'objectif; conséquemment la diffraction intervient. L'accroissement de l'image tient à ce qu'elle n'est pas géométriquement correcte. Alors même que les aberrations seraient corrigées autant qu'il est possible, la diffraction borde l'image de franges; dans l'ombre géométrique la lumière est encore assez intense pour impressionner la plaque. Corrélativement l'intensité commence à décroître dans la partie *géométrique* de l'image : pour de très petites intensités on trouve effectivement que λ est négatif.

Il est donc certain que la majeure partie de ce qu'on appelle *irradiation* est due à l'imperfection des images.

2° — Faut-il conclure de là que l'irradiation proprement dite n'existe pas? Ce serait résoudre trop vite un problème singulièrement complexe.

Nous savons que la matière sensible se présente sous forme de grains dont les dimensions peuvent atteindre 40 microns. Même en posant que

l'action ne se transmet jamais d'un grain à l'autre, il est difficile de soutenir que la réduction commencée au bout d'un grain ne chemine pas jusqu'à l'autre bout. Alors même que l'irradiation ne s'étendrait qu'aux points d'un grain, elle serait largement suffisante pour rendre illusoire la précision qu'on prétend obtenir dans l'étude des clichés formant la carte du ciel.

3° — Mais un troisième phénomène se superpose aux précédents. La préparation sensible joue le rôle de source secondaire par diffusion ou réflexion. Alors même qu'on n'admettrait pas le cheminement de l'action chimique, force est bien d'admettre la diffusion de sa cause, c'est-à-dire la dissémination de la lumière par les points de l'émulsion directement éclairés.

Plaçons au contact parfait de l'émulsion un réseau de traits noirs et transparents tels que ceux employés pour la similigravure (§ 400).

Un objectif photographique projette sur la couche sensible l'image d'un trou uniformément éclairé; on peut de cette manière réaliser sur la même couche un certain nombre de clichés, et faire varier de l'un à l'autre soit l'éclairement en diaphragmant l'objectif, soit le temps de pose. On trouve que les traits noirs du cliché sont de plus en plus larges, à mesure que croissent l'intensité ou le temps de pose.

Ici l'on ne peut plus incriminer l'imperfection des images, puisque l'image est produite par contact.

L'élargissement (qui est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre) croît proportionnellement au logarithme de l'intensité, comme il résulte de l'hypothèse d'une absorption exponentielle.

A partir des sources secondaires, l'éclairement *latéral* est de la forme :

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \qquad \log I_0 - \log I = \alpha x,$$

où x mesure la distance à une certaine origine, parallèlement à la couche et normalement aux traits noirs.

L'intensité I devant dépasser un certain minimum pour que la décomposition ait lieu, l'intensité I_0 et l'élargissement x sont liés par l'équation : $\alpha x = \log I_0 - A$.

288. **Utilisation des vieux clichés ou des plaques voilées.**

L'emploi des vieux clichés ou des plaques voilées peut être de deux sortes.

1° — On se propose d'utiliser le substratum de verre.

Généralement le verre est loin d'être parfait; cependant il est supérieur au verre à vitre ordinaire et comme tel il est bon de le conserver.

Les plaques dites *diapositives pour projection* ont un substratum particulièrement soigné.

Pour enlever la gélatine, on traite par l'acide sulfurique concentré qui l'attaque assez vite. On peut encore employer l'acide azotique.

2° — Si la plaque a été insolée par mégarde mais non développée, le cliché peut servir à obtenir des positifs par surexposition (§ 364).

Pour utiliser la couche de gélatine (§ 320), on traite par l'hyposulfite, on lave et on sèche. Si le cliché a été développé *mais non passé à l'alun* (qui insolubilise la gélatine, qui la *tanne*), on commence par dissoudre l'argent réduit dans le prussiate rouge de potassium; on traite ensuite par l'hyposulfite, on lave et on sèche.

CHAPITRE II

PHOTOGRAPHIE AU COLLODION ET A L'ALBUMINE

289. **Préparation du collodion.**

1° — Le coton-poudre est un composé nitré; il résulte de la substitution d'un certain nombre de radicaux AzO^2 à un nombre égal d'atomes d'hydrogène dans la cellulose ($n\,C^6O^5H^{10}$). Le collodion est une solution de coton-poudre dans un mélange d'alcool et d'éther.

On ne cherchera pas à fabriquer du coton-poudre : c'est une opération bien trop délicate. Les propriétés du collodion varient avec la teneur en coton-poudre; voici une formule moyenne :

Coton-poudre	Éther sulfurique à 65°	Alcool à 90°
12 gr.	660 cm³.	340 cm³.

On introduit le coton dans un flacon, on verse l'éther, on agite. On ajoute l'alcool par fractions successives. Le coton se dissout.

On laisse reposer et on décante.

Le collodion se conserve bien.

2° — Pour iodurer le collodion, on prépare la solution suivante :

Alcool absolu	Iod. d'ammonium	Iod. de cadmium	Bro. de cadmium
100 gr.	4 gr.	4 gr.	4 gr.

Au moment de s'en servir on mélange 9 volumes de collodion et 1 volume de liqueur *iodo-bromurée.*

290. **Extension et sensibilisation de la couche.**

1° — Extension.

Comme support de la couche sensible, on emploie généralement une plaque de verre ou de glace. Il faut la nettoyer parfaitement d'abord avec une solution étendue de carbonate de potassium (cristaux de ménage), puis avec de l'eau acidulée aux acides nitrique ou chlorhydrique; on lave à grande eau et on fait sécher. Au moment de s'en servir, on passe dessus un tampon de coton ou de papier Joseph.

Pour étendre le collodion, si la plaque n'est pas trop grande, on la prend entre trois doigts de la main gauche : le pouce P en dessus, le second doigt S et le troisième doigt T en dessous. On verse le collodion en 1 en quantité telle qu'il s'étende de lui-même jusqu'à l'angle α. On

incline alors de manière qu'il couvre successivement les angles 2, 3, 4.

On recueille l'excédent en 4 au moyen d'un entonnoir dans un flacon spécial (pour ne perdre in le coton ni les sels).

Il faut se garder de remettre ce collodion épaissi par évaporation avec le collodion non usagé.

Si la plaque est grande, on la place sur un chiffon qu'on tient dans la main gauche; le reste comme plus haut.

Le collodion une fois versé, on pose la plaque presque verticalement, le collodion en dessous et le bord P 4 sur du papier Joseph, jusqu'à ce que l'éther s'évapore et que collodion fasse prise.

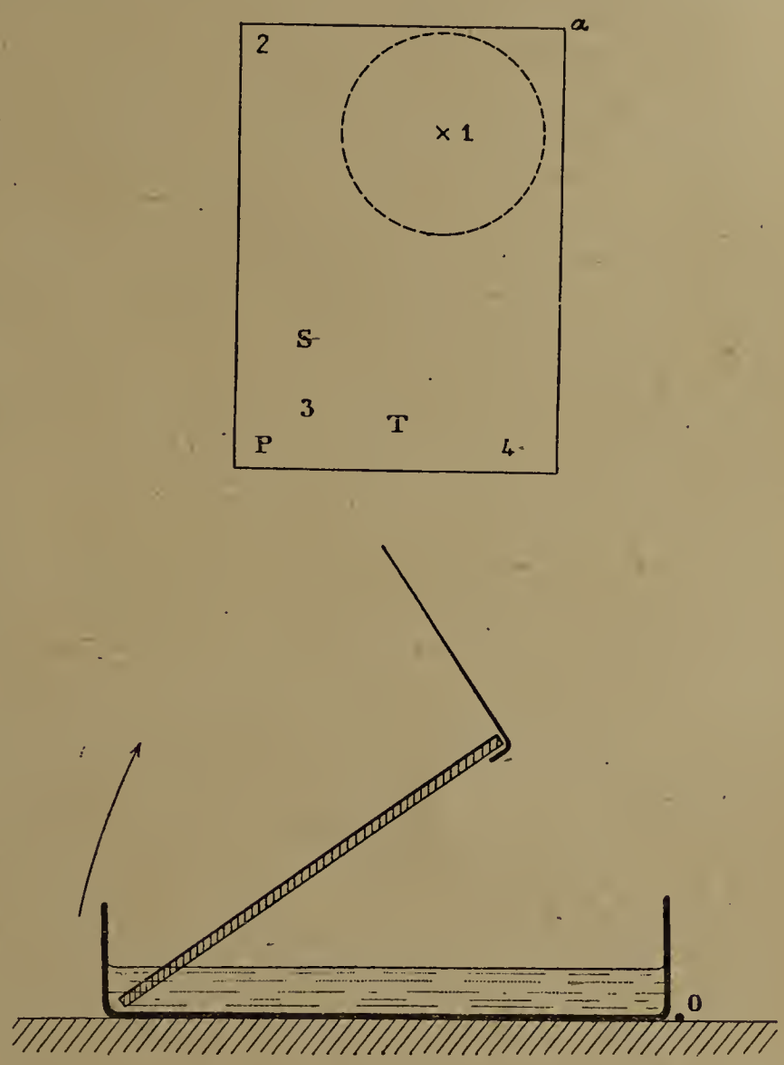


Fig. 234.

2° — Sensibilisation.

Le bain sensibilisateur est une solution d'azotate d'argent à 7 p. 100 (plus ou moins, peu importe); on ajoute quelques gouttes d'acide azotique pour éviter l'attaque de l'azotate sur les matières organiques.

On verse une quantité suffisante de ce bain dans une cuvette plate en porcelaine. On s'éclaire à la lumière rouge. On immerge la plaque collodionnée autant que possible d'un coup. Pour cela on soulève la cuvette en la faisant tourner autour de l'angle dièdre O; on pose la plaque sur l'angle dièdre opposé, comme l'indique la figure, en la retenant avec un crochet d'ébonite ou d'argent. Simultanément on ramène la cuvette dans la position horizontale et on abaisse le crochet.

La couche de collodion devient peu à peu opalescente. On balance la cuvette. Après quelques minutes, on retire la plaque du bain avec le crochet; on laisse égoutter quelques instants en la posant sur du papier buvard; on essuie le dos au papier Joseph et on introduit dans le châssis qui appartient à la chambre noire.

291. **Développement. Fixage.**

1° — Le révélateur communément employé pour le collodion humide

contient par litre d'eau, 50 grammes d'acide acétique cristallisable, 50 grammes de sulfate ferreux, enfin de 0 à 50 centimètres cubes d'alcool.

Faut-il répéter que le nombre des formules est infini? on peut prendre 25 grammes d'acide acétique ou de sulfate ferreux pour 1 000 d'eau, le cliché ne s'en portera pas plus mal. On peut remplacer l'acide acétique par l'acide tartrique, l'acide formique, l'acide sulfurique.

L'essentiel est le sulfate ferreux et le milieu acide.

L'alcool permet au liquide de s'étendre mieux sur la plaque.

Quand l'image est venue, on lave et on fixe avec une solution d'hyposulfite de sodium.

On renforce au bichlorure de mercure (§ 283).

2° — Je ne discuterai pas les théories physiques et chimiques du développement, tant ces sortes de débats me paraissent vains. Une seule chose est intéressante : quels sont les corps qui interviennent et comment interviennent-ils?

Dans le procédé au collodion humide, l'azotate d'argent en excès est indispensable au développement.

On admet qu'il est réduit par le sulfate ferreux avec production d'azotate et de sulfate ferriques :

$$6Ag . AzO^3 + 3Fe . SO^4 = 6Ag + Fe^2(SO^4)^3 + Fe^2(AzO^3)^6.$$

Mais il semble que cette réduction exige la présence d'argent réduit en quantité si minime qu'on voudra; c'est dans la précipitation de cet argent qu'interviendrait la lumière. Plus généralement elle est la cause indirecte de la réaction.

Voici les arguments donnés en faveur de cette théorie.

On trace sur une carte avec une lame d'argent un trait à peine visible. On la plonge dans le révélateur précédent additionné d'azotate d'argent. Peu à peu le trait se recouvre d'argent métallique et devient très apparent.

On développe un cliché au collodion humide. Quand tout l'azotate est réduit, on obtient une nouvelle précipitation d'argent et le noircissement du cliché en versant sur la plaque une solution d'azotate et en faisant à nouveau agir le révélateur.

Le révélateur appelé *physique* (nom très mal choisi évidemment) n'agit pas directement sur le bromure et l'iodure d'argent décomposés ou modifiés par la lumière, à l'inverse des révélateurs *chimiques* tels que ceux dont on se sert pour développer les plaques en gélatino bromure. Peu importe du reste la nature de la modification par la lumière (changement de la structure moléculaire sans changement de composition, ou, ce qui revient au même, modification de l'énergie interne — production de sous-iodure ou de sous-bromure).

Une plaque au collodion parfaitement dépouillée d'azotate d'argent, exposée à la lumière, ne donne rien au développement. Il suffit d'ajouter

un peu d'azotate d'argent au bain révélateur pour que l'image apparaisse.

292. **Papier calotype (Talbot).**

Les réactions qui se produisent sur collodion, peuvent avoir le papier comme support. On a même commencé par là : dès 1841 Talbot donna la formule du papier *calotype* qui révolutionna la photographie en fournissant un négatif. Voici du reste, à quelques détails près inutiles aujourd'hui, comment opérait Talbot. Le lecteur remarquera quel progrès constituait sa méthode sur la Daguerréotypie (§ 326).

1° — On plonge du papier à lettre glacé dans une solution d'iodure de potassium à 6 p. 100; on le sèche. Au moment de s'en servir et en opérant dans l'obscurité, on le plonge dans une solution contenant pour 100 grammes d'eau, 10 grammes d'azotate d'argent et 20 grammes d'acide acétique cristallisable.

On place le papier sensibilisé entre deux glaces et on expose quelques secondes dans une chambre noire.

On développe au moyen d'une solution concentrée d'acide gallique (ce corps est fort peu soluble), ou mieux dans une solution d'acide gallique additionnée d'un peu d'azotate d'argent.

Quand l'image est développée, on lave et on fixe à l'hyposulfite de sodium.

Le papier est donc *à image latente* et à développement; il est bien moins sensible que le collodion.

2° — Pour obtenir les positifs, on commence par rendre le papier transparent en le *cirant.* On rape dessus un peu de cire blanche que l'on fond avec un fer à repasser, à travers plusieurs feuilles de papier servant de buvard.

On utilise le cliché transparent obtenu (dianégatif) pour obtenir des positifs au châssis-presse par contact (§ 297). Comme surface sensible on emploie soit le papier précédent, soit le papier salé *à noircissement direct et sans développement* dont nous parlerons au § 297.

293. **Collodion sec. Sensibilisateurs.**

Tandis que le collodion *humide* conserve un grand intérêt pratique, les procédés *secs* n'en ont plus; il faut cependant en parler, parce qu'ils éclairent la théorie du collodion humide.

L'expérience montre qu'à la longue l'azotate d'argent agit sur l'iodure et le bromure d'argent pour donner des corps décomposables par l'eau; il agit aussi sur le collodion. D'où la nécessité de le supprimer par des lavages. Mais par là on diminue considérablement la sensibilité; en particulier l'iodure devient inerte en l'absence d'azotate : d'où la nécessité de n'employer que le bromure. Pour des raisons de solubilité dans le collodion, le bromure d'ammonium est préféré; le collodion doit en contenir relativement beaucoup.

Dans le collodion bromuré et sensibilisé, on supprime donc l'excès de nitrate par un lavage qu'il est préférable d'effectuer à l'eau distillée.

En définitive nous avons une plaque *au collodiobromure d'argent.* Elle présente l'inconvénient de se dessécher et de ne plus être perméables aux réactifs; d'où une série de procédés pour la maintenir spongieuse. On a essayé l'albumine, le tannin, la gélatine, la gomme, jusqu'au jour où simplement on a substitué la gélatine au collodion.

Si l'on veut encore se servir du révélateur *physique* (§ 291), on y ajoutera du nitrate d'argent. Mais l'effet sera toujours médiocre, parce que l'action n'est plus que superficielle. On a donc passé aux révélateurs *chimiques* qui sont actuellement employés pour le gélatinobromure; ils agissent directement sur le bromure impressionné par la lumière.

Nous n'insistons pas, les procédés au collodion sec étant complètement abandonnés.

294. **Ferrotypie.**

1° — Une épreuve au collodion est négative par transparence. Elle est positive par réflexion, ce qui exige qu'on l'éclaire par devant et qu'on la regarde sur fond sombre : les grains d'argent jouent le rôle de miroirs.

Pour obtenir un positif, il suffit donc que le support de la couche sensible soit opaque (tôle vernie, toile cirée noire,...) ou transparent (verre, mica,...); il faut alors après séchage recouvrir la face collodionnée d'un vernis noir. Dans le premier cas l'image est retournée; elle est redressée dans le second (§ 281).

On trouve dans le commerce des plaques de tôle 26 × 36 centimètres, par conséquent ayant quatre fois la surface d'un 13 × 18, dont le prix est de l'ordre de 50 centimes. Elles sont recouvertes d'un vernis noir, lisse et solide. C'est à la tôle que le procédé doit son nom. L'avantage de ce substratum est d'être découpable à volonté, en particulier de permettre l'emploi d'objectifs multiples, l'obtention simultanée d'un grand nombre d'épreuves d'une image de petites dimensions, leur développement simultané et leur découpage ultérieur; ce qui est bien plus difficile avec un substratum de verre qu'on doit couper au diamant.

Le fer précipitant l'argent de ses solutions, on passera du vernis à la gomme laque sur les parties mises à nu par les ciseaux.

On évitera de toucher la plaque de tôle avec les doigts.

Le collodionnage et la sensibilisation de la couche se font comme d'habitude. On recommande un collodion contenant peu de coton-poudre (8 grammes au lieu de 12, dans la formule du § 289).

Du reste peu importe.

La pose doit être plutôt faible.

2° — Le développement a une importance capitale.

Il faut que les grains d'argent soient gros, par suite que la précipitation soit lente; la couche est alors très réfléchissante.

Le révélateur contiendra donc par exemple pour 1 000 grammes d'eau,

30 grammes de sulfate ferreux, 30 d'acide acétique, 1 centimètre cube d'acide nitrique et 30 centimètres cubes d'alcool.

Le fixage se fait bien au cyanure de potassium (2 p. 100); mais ce corps est un poison violent.

L'épreuve lavée, séchée (en la mettant au-dessus d'une lampe à alcool, quand il faut aller vite), est vernie avec une solution à 8 p. 100 de copal dans la benzine.

3° — La ferrotypie doit sa mauvaise réputation à son emploi dans les foires; c'est injustement qu'elle porte la responsabilité des méfaits d'opérateurs incapables. Elle donne des images retournées, ce qui n'a pas d'inconvénient pour le portrait de gens qui ne sont ni borgnes, ni partiellement essorillés. Elle permet les épreuves multiples et leur découpage ultérieur.

Pour obtenir une épreuve sur une feuille mince de mica, on humecte avec de l'eau gommée et on colle sur une plaque de verre servant de support provisoire. L'épreuve obtenue, on détache le mica avec un canif. On couvre la face collodionnée d'un vernis noir (benzine 500 cm³, bitume de Judée 150 gr., caoutchouc 3 gr.) qu'on prépare au bain-marie et qu'on applique au pinceau.

295. **Procédé à l'albumine.**

J'indique l'essentiel du procédé à l'albumine parce qu'il peut servir dans certaines expériences d'optique où l'extrême finesse du grain est nécessaire.

On prend des blancs d'œuf qu'on bat avec un balai d'osier ou une fourchette de bois (pas de métal) jusqu'à ce que la mousse soit assez consistante pour être coupée. On laisse reposer douze heures; on décante en ne gardant que le dessus du liquide. On fait dissoudre dans un peu d'eau 1 gramme d'iodure et 0,25 gramme de bromure (potassium ou ammonium) pour 100 centimètres cube d'albumine; on mélange avec l'albumine. On filtre plusieurs fois, en évitant les poussières. Il est bon de laver le filtre d'abord à l'eau distillée.

Comme substratum on se sert d'une glace qu'on nettoie soigneusement. L'albumine est étendue avec une pipette et séchée dans une position parfaitement horizontale. Pour cela on la pose, albumine en dessous, sur trois vis calantes, disposées sur une plaque métallique qu'on chauffe légèrement en dessous.

On sensibilise en immergeant 3 minutes dans un bain contenant pour 100 grammes d'eau, 10 grammes d'azotate d'argent et 10 grammes d'acide acétique. On retire et (voici où le procédé diffère du collodion humide) *on lave, on sèche.* Les plaques se conservent plusieurs jours, tandis que les plaques en collodion humide doivent être employées sur l'heure.

On recommande de développer avec une solution saturée (1 p. 100) d'acide gallique $C^6H^2(OH)^3(COOH)$, additionnée de quelques gouttes

d'une solution à 10 p. 100 d'acide pyrogallique dans l'alcool. Quand l'image apparaît, on ajoute quelques gouttes d'une solution d'azotate d'argent à 3 p. 00. Pour cela on les met dans un verre dans lequel on verse le révélateur; on agite, on reverse le mélange sur le cliché.

Le développement est généralement lent.

On fixe à l'hyposulfite de sodium.

CHAPITRE III

PAPIERS PHOTOGRAPHIQUES

Papiers au sel d'argent.

296. **Décomposition du chlorure d'argent.**

1° — Si le chlorure d'argent pur et sec est décomposé par la lumière, ce qui est discuté, en tout cas il l'est avec une extrême lenteur.

En présence de l'eau, la décomposition est plus rapide; une partie du chlore se dégage et donne de l'acide chlorique ClO^3H, ou de l'acide hypochloreux $ClOH$; là-dessus les chimistes ne sont pas d'accord.

$$6Cl + 3H^2O = 5HCl + ClO^3H,$$
$$2Cl + H^2O = HCl + ClOH.$$

L'acide chlorhydrique formé ralentit la réaction.

On discute aussi sur la nature de la matière noire produite par la lumière. Est-ce un sous-chlorure Ag^2Cl? Est-ce de l'argent métallique?

L'acide azotique à froid agissant sur le *chlorure noirci*, ne dissout rien. Mais si l'on dissout le chlorure dans ses solvants ordinaires, l'acide azotique dissout la poudre noire abandonnée. Le noir du chlorure noirci serait donc un sous-chlorure, non soluble dans l'acide azotique *froid*, mais qui se décompose et donne de l'argent sous l'action des solvants ordinaires du chlorure.

Au surplus tout cela nous est indifférent. Ce qu'il faut en retenir est l'importance du milieu. Le chlorure d'argent employé seul en couche mince ne fournit pas les mêmes réactions qu'en présence du papier, de l'encollage additionnel et des restes d'azotate d'argent ou de chlorure soluble qui le produisent par double décomposition. Le papier sensible au chlorure d'argent est un système duquel il n'est pas permis de séparer le chlorure.

Toujours est-il que le papier *pur* (papier filtre) recouvert de chlorure d'argent (par double décomposition, voir plus loin), bien lavé pour chasser l'excès d'azotate d'argent, séché, puis exposé à la lumière, cesse d'être blanc, fonce et devient gris violacé; mais sa sensibilité est très faible.

2° — Le papier *pur* plongé dans une solution d'azotate d'argent, séché puis exposé à la lumière, subit une altération très lente. C'est qu'en effet l'acide azotique libéré arrête la décomposition.

Si, au contraire, le papier est encollé avec de l'amidon ou de la gélatine, soit dans la masse, soit superficiellement, l'action est plus rapide.

Enfin, si le papier contient à la fois du chlorure, de l'azotate et une matière capable d'éliminer le produit des réactions, le noircissement est très rapide.

On admet que le papier sensible complet, insolé pendant un temps suffisant, contient à la surface de l'argent réduit, au-dessous du sous-chlorure d'argent, enfin dans les couches profondes du chlorure inaltéré.

297. **Papiers salés, papiers albuminés et salés.**

1° — Dans l'industrie on utilise un papier sensible excellent, peu coûteux, mais qui ne se conserve pas.

Le papier est un feutre formé par l'entre-croisement de fibres végétales (cellulose). Sa fabrication consiste à isoler les fibres pour les mettre dans un état tel que le feutrage devienne possible.

Le papier *normal* brûle sans laisser de résidu.

Pour éviter que le papier ne soit *buvard*, on l'encolle généralement dans la masse. On s'appuie sur la propriété de certaines résines (colophane, par exemple) de se conduire comme des acides faibles et de donner avec le carbonate de sodium un *résinate* soluble, improprement appelé *savon de résine*. On mélange le savon à la pâte de papier et on le précipite sur les fibres au moyen d'alun; il se forme un résinate d'aluminium qui adhère à la cellulose et qui possède les propriétés agglutinantes de la résine. On ajoute parfois de l'amidon.

Outre la cellulose et l'encollage, le papier contient généralement une *surcharge* de kaolin, de sulfate de baryum, de sulfate de calcium,... qui augmentent le poids et sont des manières de fraude.

Le papier photographique doit en être exempt.

2° — Le papier pour positifs est simplement salé, s'il contient de l'amidon comme encollage, ou albuminé et salé.

Pour le saler, on le trempe dans l'eau contenant 2 ou 3 p. 100 de chlorure de sodium ou d'ammonium.

Après un temps d'immersion suffisant, on retire et on sèche.

Pour albuminer et saler, on prend des blancs d'œufs auxquels on ajoute 30 grammes de chlorure par litre, et de l'eau si l'on veut. On bat avec un balai d'osier, on filtre à travers un tamis de crins. Après 24 heures ou quelques jours on utilise. Pour cela, on filtre sur une éponge, on verse dans une cuvette plate. On mouille le papier en le passant *sur* la surface du liquide. On égoutte et on fait sécher.

Pour sensibiliser on passe la feuille *sur* un bain à 10 p. 100 d'azotate d'argent dans lequel on ajoute quelques gouttes d'une solution de car-

bonate de soude, jusqu'à suppression de toute acidité, en pratique jusqu'à ce qu'un précipité blanc de carbonate d'argent commence à se former. On laisse deux à trois minutes la surface à impressionner au contact du bain de nitrate, on retire et on sèche. Cette opération doit être faite à la lumière rouge.

Ces papiers s'altèrent en quelques jours en raison de la présence d'un excès d'azotate; mais ils sont peu coûteux et donnent au virage de très belles nuances. En ajoutant de l'acide citrique au bain d'azotate, on rend le papier plus stable.

Au moment de l'employer, on conseille de le soumettre au gaz ammoniac qui se dégage d'une solution versée dans une cuvette. Non seulement on neutralise ainsi le milieu, mais on prépare un absorbant pour le chlore et l'acide azotique qui résultent de l'action de la lumière. La sensibilité est notamment accrue.

3° — L'exposition se fait, en plein soleil ou à la lumière diffuse, par contact avec le cliché dans un *châssis-presse*.

C'est une boîte plate dont le fond est constitué par une glace épaisse. On pose sur la glace le cliché image en dessus, on recouvre du papier couche sensible en dessous; on superpose du papier, puis une planchette PP à charnières. Enfin on serre avec des barres transversales à charnières BB sur lesquelles sont fixées des ressorts R.

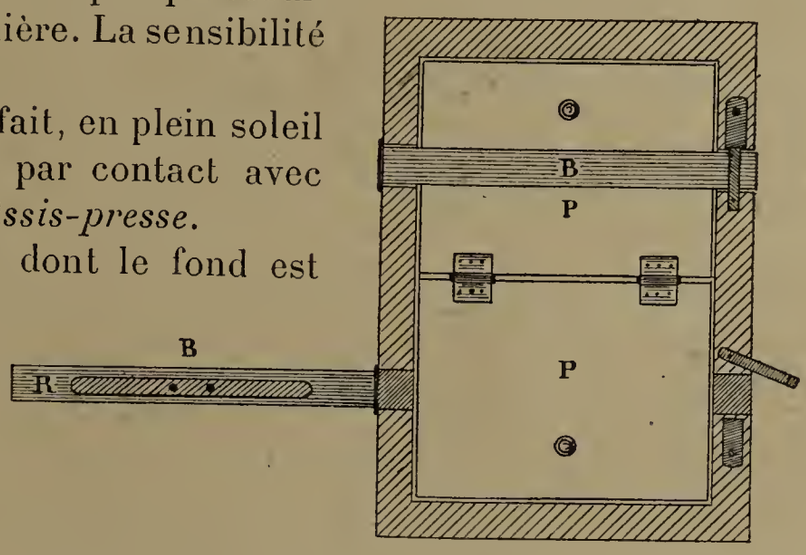


Fig. 235.

La figure 235 montre le dos du châssis presse.

Le papier étant *à noircissement direct*, on regarde de temps en temps ce qui se passe en ouvrant une des barres, rabattant un des côtés de la planchette P et soulevant le papier sensible; il faut évidemment ne pas opérer en pleine lumière. Au sortir du châssis, l'épreuve doit avoir une belle couleur violacée.

On fixe à l'hyposulfite de sodium, on lave à grande eau assez longtemps pour éliminer tous les sels. On sèche.

Généralement on fait *virer* l'épreuve avant de la sécher.

298. **Papiers vendus tout préparés.**

Le bain d'argent ci-dessus utilisé est neutralisé avec du carbonate de sodium.

Pour obtenir des papiers qui se conservent il faut, au contraire, exagérer la réaction acide.

Par exemple le papier est sensibilisé dans un bain qui contient pour

100 grammes d'eau, 8 grammes d'azotate d'argent, *autant d'acide citrique* et 10 cm^3 d'alcool.

On trouve dans le commerce des papiers non plus sensibilisés dans la masse, mais recouverts d'une émulsion. On commence par les *coucher*; ici l'opération consiste à recouvrir le papier d'une mince couche opaque de l'émulsion suivante :

Eau	Gélatine	Sulfate de baryte
1 200	100	50

Sur cette couche repose l'émulsion sensible de gélatinochlorure d'argent préparée comme nous l'avons dit pour le gélatinobromure.

299. **Virage au chlorure d'or.**

L'épreuve aux sels d'argent est d'une couleur assez déplaisante. Le *virage* la modifie; il présente aussi l'avantage de rendre l'épreuve moins altérable.

Le virage ordinaire a lieu dans une solution de chlorure d'or à 1 p. 100. Le chlorure d'or du commerce se présente en cristaux jaunes déliquescents. Il a pour formule : $AuHCl^4 + 3H^2O$; c'est un composé de chlorure $AuCl^3$ (qui n'existe pas dans le commerce) avec de l'acide chlorhydrique.

On le prépare en dissolvant l'or dans l'eau régale. Par évaporation au bain de sable, on obtient une liqueur sirupeuse qui par refroidissement donne le chlorure d'or du commerce.

D'où la nécessité de saturer l'acide chlorhydrique dans le bain de virage. On emploie pour cela de la craie ou de l'acétate de sodium.

Dans ce dernier cas, il se forme un chlorure double $AuNaCl^4 + 2H^2O$.

De jaune qu'était la solution primitive, elle devient incolore par neutralisation.

Pendant le virage, l'or se substitue à l'argent :

$$AuCl^3 + 3Ag = 3AgCl + Au.$$

La rapidité du virage croît avec l'acidité du bain; il est donc plus rapide, quand on neutralise avec l'acétate de sodium cristallisé, qu'avec l'acétate fondu ou avec le carbonate. Les épreuves virées et fixées sont rouges dans le premier cas, violettes dans un bain neutre, noires dans un bain alcalin.

300. **Virage au ferricyanure de potassium.**

Le ferricyanure de potassium en présence de l'argent réduit donne du ferrocyanure d'argent et du ferrocyanure de potassium :

$$2(Fe^2Cy^{12})K^6 + 4Ag = 3(FeCy^6)K^4 + (FeCy^6)Ag^4. \qquad (1)$$

Le ferrocyanure de potassium versé dans une solution d'un sel fer-

rique donne du bleu de Prusse [ferrocyanhydrate ferrique, $(FeCy^6)^3Fe^4$].

$$3(FeCy^6)K^4 + 2Fe^2Cl^6 = (FeCy^6)^3Fe^4 + 12KCl. \qquad (2)$$

Ceci posé voici la technique du procédé.

On fait une première solution contenant pour 100 d'eau, 10 d'acide acétique, 1 de ferricyanure de potassium (prussiate rouge de commerce). Elle s'altère assez vite à la lumière (§ 305).

Comme sel ferrique, le perchlorure est proscrit parce qu'il attaque l'argent. On utilise le citrate de fer ammoniacal (écailles brillantes de couleur grenat), sous forme d'une solution contenant pour 100 d'eau, 10 d'acide acétique, 1 de citrate.

On la conserve dans un flacon jaune à l'abri de la lumière.

On mélange les solutions en mettant 2 de la première, 3 de la seconde; on fait agir sur la couche sensible fixée et bien lavée, en particulier bien dépouillée d'hyposulfite.

On opère à l'abri de la lumière en maintenant le bain immobile.

L'image vire au bleu.

On lave à grande eau. Le ferrocyanure d'argent étant opaque, on peut le dissoudre dans l'hyposulfite.

301. **Obtention d'images non inversées.**

Par rapport au cliché, le papier fournit un négatif.

De nombreuses méthodes donnent un positif; voici la plus intéressante et la plus ancienne (Bayard).

On noircit en plein jour une feuille de papier au chlorure et au nitrate d'argent (§ 297). On lave. On traite par une solution d'iodure de potassium. On sèche. On expose sous le cliché.

Sous l'influence de la lumière, l'iodure de potassium réagit sur l'argent; il se produit de la potasse et de l'iodure d'argent. Le papier blanchit donc d'autant plus que l'action lumineuse est plus forte.

On lave. On fixe à l'hyposulfite.

302. **Papiers transferts.**

On trouve aujourd'hui dans le commerce des papiers sensibilisés à noircissement direct, donnant des épreuves par contact comme les papiers ordinaires, *mais dont la couche sensible peut se détacher du papier et être transportée sur le substratum choisi.*

Ils se composent d'une couche de collodion sensibilisé, d'une couche de gélatine, enfin du papier. On insole sous un cliché, on vire, on fixe. On lave et on transporte sur le substratum convenablement préparé. On laisse sécher.

Il ne reste plus qu'à plonger dans l'eau *chaude* (à 50° par exemple) : la gélatine se dissout et le papier se détache.

Le substratum (généralement une plaque de verre) est parfaitement nettoyé et couvert d'une couche de solution à 2 p. 100 de caoutchouc (non

vulcanisé) dans la benzine. On peut encore utiliser les plaques au gélatinobromure voilées ou les vieux négatifs. Dans le premier cas, on dissout les sels d'argent dans l'hyposulfite, on lave et on sèche. Dans le second on traite par une solution contenant pour 100 grammes d'eau, 10 grammes de prussiate rouge et 10 grammes d'hyposulfite; l'argent réduit disparu, on lave et on sèche.

On applique la pellicule transférable sous l'eau; on sort de l'eau, on presse avec un râteau, on laisse sécher. Enfin on traite par l'eau chaude.

Ce procédé permet d'obtenir des vitraux. Par rapport au cliché dont on part, il fournit un négatif *droit*, ce qui est parfois avantageux.

Papiers aux sels de fer.

303. **Rappel de quelques notions de chimie.**

1° — Il est indispensable de rappeler ici quelques notions de chimie.

Les sels de fer sont de deux espèces; les sels *ferreux* généralement verts qui dérivent de l'oxyde FeO, où le fer Fe se conduit comme bivalent; les sels *ferriques* généralement rougeâtres qui dérivent de l'oxyde Fe^2O^3, où le groupement Fe^3 est hexavalent.

A l'air les sels ferreux s'oxydent et deviennent ferriques.

Il paraît que les rayons *rouges* activent la réaction.

En traitant la limaille de fer par l'acide chlorhydrique, on obtient le chlorure ferreux $FeCl^2$ qui par évaporation se dépose sous forme de cristaux *verts* $FeCl^2 + 4H^2O$.

Envoyons un courant de chlore dans une solution de chlorure ferreux, ou encore traitons l'oxyde Fe^2O^3 par l'acide chlorhydrique, nous obtenons le chlorure ferrique Fe^2Cl^6 qui hydraté forme des cristaux *jaunes*.

Nous utiliserons par la suite la solution aqueuse de ce chlorure.

Le sulfate ferreux se présente sous forme de cristaux verts $SO^4Fe + 5H^2O$. On l'obtient par l'action de l'acide sulfurique sur des déchets de fer. A l'air il s'oxyde et donne le sulfate ferrique $(SO^4)^3Fe^2$.

2° — Ferro et ferricyanures.

Parmi les sels de fer, les cyanures doubles ont une importance particulière du point de vue qui nous occupe.

Acide ferrocyanhydrique et ses sels.

Nous partons du *prussiate jaune de potassium* $(Cy^6Fe)K^4$, qu'on obtient en calcinant en vase clos des matières azotées (débris de corne et de cuir) avec du carbonate de potassium.

On lave à l'eau bouillante, on ajoute du fer métallique; le cyanure de potassium formé donne par ébullition le sel cherché :

$$6\,KCy + Fe + 2H^2O = (Cy^6Fe)K^4 + 2KOH + H^2.$$

Il cristallise en gros cristaux jaunes.

Traité par l'acide chlorhydrique, il donne l'*acide ferrocyanhydrique* :

$$(Cy^6Fe)K^4 + 4HCl = (Cy^6Fe)H^4 + 4KCl.$$

Avec les sels ferriques, le ferrocyanure de potassium précipite le *bleu de Prusse*, sel ferrique de l'acide ferrocyanhydrique :

$$(Cy^6Fe)^3Fe^4.$$

C'est une matière colorante énergique.

Les ferrocyanures sont donc caractérisés par la présence du radical tétravalent Cy^6Fe.

ACIDE FERRICYANHYDRIQUE ET SES SELS.

Faisons passer un courant de chlore dans une solution de *prussiate jaune* ou *ferrocyanure de potassium*.

Il se fait du *ferricyanure de potassium* ou *prussiate rouge* :

$$2(Cy^6Fe)K^4 + Cl^2 = (Cy^{12}Fe^2)K^6 + 2KCl.$$

Les ferricyanures sont caractérisés par le radical hexavalent, $Cy^{12}Fe^2$.

Le prussiate rouge se présente en cristaux rouge rubis, parfois recouverts d'un dépôt ocreux.

Traité par l'acide chlorhydrique, il donne l'acide ferricyanhydrique $(Cy^{12}Fe^2)H^6$.

En présence des sels ferreux, il précipite le *ferricyanure ferreux* ou *bleu de Turnbull* $(Cy^{12}Fe^2)Fe^3$.

304. Généralités sur les papiers aux sels de fer.

La lumière agit sur les sels ferriques et les ramène à l'état de sels ferreux. En utilisant les réactifs ordinaires de ces sels (ferro et ferricyanures de potassium), on obtient des photocopies.

Les procédés aux sels ferriques sont nombreux et très employés pour copier les plans ou les dessins (obtention des *bleus* de machines). Aux papiers industriels on ne demande pas de demi-teintes : ils doivent fournir des traits tranchant brutalement sur le fond. La couche sensible est épaisse et doit être impressionnée jusqu'au substratum.

On obtient une image *retournée*. Mais comme on reproduit généralement des dessins effectués sur papier mince, on obtient une image redressée en retournant le dessin, ce qui n'a pas d'inconvénient.

Les dessins en traits blancs sur fond bleu sont désagréables à l'œil (§ 305); il est préférable d'obtenir des traits bleus ou noirs sur fond blanc (§§ 309 et 310).

La *platinotypie* utilise bien un sel de platine, mais l'action lumineuse porte sur un sel de fer; nous la rangeons donc dans les procédés au fer.

305. Papier au citrate et au tartrate ferriques (dit au ferroprussiate).

Il est connu sous le nom de *procédé au ferroprussiate*, ce qui est

absurde, puisque c'est le prussiate rouge de potassium ou ferriprussiate qui intervient (§ 303).

On fait deux solutions de 25 grammes de citrate ferrique ammoniacal et de 25 grammes de prussiate rouge dans 100 grammes d'eau. On mélange les deux liquides, on filtre et étend sur le papier. On sèche et on conserve à l'abri de la lumière et de l'humidité..

On expose sous un cliché. La lumière ramène le citrate ferrique à l'état de sel ferreux; d'où formation de bleu de Turnbull par action du prussiate rouge.

Le papier, qui était verdâtre, vire au bleu partout où agit la lumière.

Quand l'exposition paraît suffisante, on sort du châssis, et on lave à grande eau. Le bleu reste adhérent, les autres sels sont dissous. On a donc une copie où le dessin est reproduit en traits blancs sur fond bleu.

En place de citrate ferrique, on utilise parfois le tartrate obtenu par l'action de l'acide tartrique sur une solution de perchlorure de fer avec addition d'ammoniaque.

306. **Action de la lumière sur le perchlorure de fer.**

1° — Les solutions de Fe^2Cl^6 dans l'alcool et dans l'éther (qui sont rouges) se décolorent à la lumière. De l'oxyde se précipite; le sel dissous passe à l'état de chlorure ferreux FeCl.

2° — On mélange une solution de chlorure ferrique avec une solution d'acide oxalique. On en remplit une éprouvette qu'on renverse sur un bain de même nature. *Dans l'obscurité*, il ne se produit rien. *A la lumière* on constate un abondant dégagement d'anhydride carbonique. L'acide oxalique joue le rôle de réducteur :

$$(COOH)^2 = 2CO^2 + H^2.$$

Il se forme du chlorure ferreux.

307. **Procédé par saupoudrage au perchlorure de fer (Poitevin).**

Poitevin a basé un très curieux procédé par saupoudrage sur l'action de la lumière sur le perchlorure de fer en présence de l'acide tartrique.

On fait une solution dans 100 grammes d'eau, de 10 grammes de chlorure ferrique et de 5 grammes d'acide tartrique. On commence par dissoudre séparément les deux corps puis on mélange les solutions.

Le liquide se conserve dans l'obscurité.

Pour s'en servir, on l'étend sur du papier ou sur une glace finement dépolie; on fait sécher. Avec la glace on doit utiliser un égouttoir porte-glace sur lequel on pose la glace, le côté préparé en dessous.

On réalise ainsi une couche *sèche au toucher*, brillante et semblable à un vernis; elle se conserve quelques jours.

L'exposition à la lumière se fait dans un châssis sous un négatif. On pose 5 minutes au soleil, 20 minutes à l'ombre. Les parties insolées où s'est produit du chlorure *déliquescent*, deviennent hygroscopiques; elles absorbent l'humidité de l'air.

Elles sont alors aptes à retenir des poudres.

Quelques minutes après la sortie du châssis, on promène sur la couche un pinceau très doux trempé dans la poudre noire ou colorée (du charbon, par exemple) : le dessin apparaît avec ses demi-teintes. On fait *monter* les régions lentes à venir en soufflant dessus.

Si l'insolation est exagérée, le dessin s'empâte.

Rien n'empêche d'utiliser comme poudre de l'émail (§ 324).

Pour transporter sur papier ou sur un autre support le dessin obtenu sur une glace dépolie, on recouvre d'une couche de collodion normal. On lave à l'eau froide ordinaire, à l'eau acidulée d'acide chlorhydrique qui détruit l'adhérence, puis encore à l'eau ordinaire. On applique une feuille de papier gélatiné et mouillé; on fait sécher.

Le papier séché se détache de lui-même entraînant le collodion et la poudre. On obtient ainsi une épreuve retournée.

Pour éviter le retournement, on peut réaliser un double transfert. Au lieu d'appliquer du papier gélatiné, on emploie du papier ordinaire qui sous l'eau entraîne aisément la couche de collodion. On reporte alors sur du papier gélatiné; on applique par pression : sans attendre le séchage, on enlève le papier auxiliaire en le tirant par les coins.

308. — **Papier au perchlorure de fer (cyanofer ou cyanotype).**

Le papier est imprégné d'une solution de perchlorure de fer Fe^2Cl^6 dans de l'eau *gommée* à laquelle on ajoute de l'acide oxalique ou de l'acide tartrique. Sous l'action de la lumière, il se forme un sel de protoxyde de fer et du chlorure $FeCl^2$. De plus, et c'est une partie essentielle du procédé, les mucilages (gomme, dextrine, albumine, gélatine) deviennent imperméables sous l'action du chlore mis en liberté dans la transformation du sel ferrique en sel ferreux, c'est-à-dire *médiatement* sous l'action de la lumière.

L'exposition faite, traitons par une solution de prussiate jaune à 10 p. 100. Sous les traits du dessin, le mucilage est resté perméable; le prussiate jaune agit sur le sel ferrique et donne du bleu de Prusse. Hors des traits, le sel ferrique est devenu ferreux; il a rendu le mucilage imperméable : le prussiate ne pénètre pas.

S'il pénétrait, il donnerait avec les sels ferreux un précipité *blanc, mais qui bleuit à l'air*. D'où la nécessité de la gomme.

Quand le développement paraît suffisant on lave à grande eau. On supprime l'excès des sels de fer en plongeant dans un bain à 3 p. 100 d'acide sulfurique. Dans ce bain, il se produit un précipité bleu non adhérent qu'on enlève avec un tampon de coton. On lave à l'eau et on sèche.

Les traits de la photocopie sont bleus sur fond blanc.

309. **Papier au sulfate ferrique (dit héliographique).**

Le procédé est très analogue au précédent. On imprègne la plaque

d'une solution de sulfate ferrique dans de l'eau gommée avec addition d'acide tartrique.

Sulfate ferrique	Acide tartrique	Gomme maligne	Eau
15	25	25	500

On fait les solutions séparément, puis on les mélange.

On insole sous un dessin. On développe à l'acide gallique (solution à 8 p. 100) qui agit sur le sel ferrique et donne de l'encre.

On obtient donc une photocopie en traits noirs sur fond blanc.

Parfois on ajoute du perchlorure de fer au sulfate ferrique.

310. **Papier à l'oxalate ferrique (platinotypie).**

L'oxalate ferrique est transformé par la lumière en oxalate ferreux :

$$(COO)^6Fe^2 = 2(COO)^2Fe + 2CO^2.$$

Cet oxalate est un réducteur énergique (§ 222); on peut donc s'en servir pour précipiter l'or, l'argent ou le platine de leurs sels.

En particulier la *platinotypie* est basée sur cette réaction : la réduction du sel de platine y est indirecte.

Le papier platinotype contient à la fois de l'oxalate ferrique et du chlorure double de platine et de potassium (chloroplatinite $PtCl^4K^2$).

L'oxalate ferrique est obtenu en précipitant l'oxyde Fe^2O^3 par l'action de la soude sur une solution de perchlorure de fer Fe^2Cl^6, en lavant et en traitant par l'acide oxalique.

Pendant l'exposition l'image apparaît incomplètement; on termine le développement au moyen d'un solution chaude d'oxalate de potassium.

On trouve aujourd'hui dans le commerce des papiers *au platine* pour lesquels le développement est supprimé. Il suffit de laver avec une solution d'acide chlorhydrique à 10 p. 100 pour enlever les sels de fer.

CHAPITRE IV

EMPLOI DE LA GÉLATINE ET DES CORPS SIMILAIRES

311. Obtention de la gélatine.

1° — La gélatine, la colle de poisson, la colle forte, la colle à bouche, ... sont la même matière plus ou moins pure obtenue en traitant par l'eau chaude ou par la vapeur, pendant un temps plus ou moins long, ce qu'on appelle les *collematières*. En voici une liste succinte : la peau, l'intestin, l'estomac, la vessie natatoire des poissons, en particulier des morues, les rognures de cuir, les débris de peau, les tendons des bœufs et des chevaux, les peaux de tête de veau, les têtes et les pieds de moutons, parfois la viande de cheval et la chair de poisson, les os, les déchets de boutons, les cornes,.....

Les collematières sont d'abord traitées par la chaux pour éviter leur putréfaction. On les plonge dans un lait de chaux vive où on les laisse 2 ou 3 semaines; on renouvelle de temps en temps la chaux.

On les retire, on les lave, on les laisse à l'air pour carbonater ce qui reste de chaux.

2° — L'extraction consiste à chauffer assez longtemps dans l'eau, absolument comme pour faire un pot-au-feu ou un bœuf-mode : on sait que si la concentration est grande, le bouillon se prend en gelée : il s'est précisément produit de la gélatine. L'extraction doit avoir lieu à la plus basse température possible. D'où la nécessité de la fractionner, c'est-à-dire de soutirer le produit de temps en temps. Leur qualité diminue à mesure que l'extraction demande une température plus élevée. Les premières cuites ont lieu à 45° ; les dernières jusqu'à 75.

Mais tandis que d'abord on soutire un produit peu coloré, ce qui vient en dernier lieu est brun ou noir.

Pour les os, au contraire, on opère en autoclave jusqu'à 135°, température qui correspond à 3 atmosphères.

Supposons obtenu le bouillon gélatineux : il faut l'évaporer à basse température (70°). On le verse dans un demi-cylindre de tôle dans lequel et au-dessus duquel tourne un système de serpentins en forme de spirale, chauffés intérieurement par la vapeur, leur surface extérieure se mouille en plongeant dans le liquide et présente, quand elle en sort, une aire d'évaporation considérable.

Le bouillon doit être purifié et décoloré. Quand il s'agit de préparer de la colle forte, on le laisse simplement déposer, ce qui supprime les débris fibreux et les matières étrangères. On utilise l'anhydride sulfureux pour les bouillons qui doivent devenir incolores.

On verse ensuite le bouillon dans des moules où il se solidifie par refroidissement. Enfin on découpe la gélatine ou la colle avant de les dessécher.

3° — Les gélatines fines servent à faire les confitures, les gelées de viande, à coller les vins et à clarifier les liquides alcooliques. Elles entrent dans la préparation des pâtes de fruits, des réglisses, des capsules pour médicaments. On les utilise dans le collage du papier, pour fabriquer des perles, etc., etc.

La gélatine est partie constituante des plaques au gélatinobromure. Nous allons voir que ses usages photographiques sont très nombreux.

312. **Propriétés de la gélatine.**

1° — Lorsque la gélatine est parfaitement sèche, elle est cassante; tout le monde a manipulé de la colle à bouche ou de la colle de poisson.

A FROID la gélatine n'est pas soluble; mais elle absorbe l'eau, se gonfle et va même jusqu'à donner une gelée. Une bonne gélatine photographique doit absorber de 6 à 15 fois son poids d'eau froide.

A CHAUD la gélatine est très soluble dans l'eau.

L'alun de potassium ou d'ammonium

$$Al^2K^2(SO^4)^4 + 24H^2O, \qquad Al^2(AzH^4)^2(SO^4)^4 + 24H^2O,$$

modifie la gélatine. Vis-à-vis de l'eau, il la rend moins perméable à froid et moins soluble à chaud; *il la tanne.*

Une gélatine trop tendre est durcie par un bain à 1/2 p. 100 d'alun.

2° — GÉLATINE BICHROMATÉE.

La gélatine traitée par une solution de bichromate de potassium (2 à 6 grammes p. 100 d'eau) prend des propriétés particulières sous l'action de la lumière.

A FROID, elle devient incapable d'absorber l'eau, par suite ne se gonfle pas. Corrélativement, en présence de l'eau elle fixe les encres grasses (§ 416); elle est imperméable aux réactifs (§ 386).

A CHAUD, elle devient insoluble dans l'eau.

On a cru longtemps qu'il s'agissait d'une oxydation; en réalité les modifications sont dues à l'action spécifique des sels de chrome.

En présence d'une matière organique capable de s'oxyder, la lumière dédouble le bichromate en chromate et anhydride chromique :

$$Cr^2O^7K^2 = CrO^4K^2 + CrO^3.$$

L'anhydride chromique cède son oxygène à la matière organique et donne du chromate d'oxyde de chrome :

$$3CrO^3 = Cr^2O^3,\ CrO^3 + 3O.$$

C'est un corps brun.

Corrélativement, du papier amidonné et imprégné de bichromate de potassium fournit, sous un négatif, des photocopies brunes.

Le chromate chromique est instable en présence de l'eau :

$$2Cr^2O^3,\ CrO^3 = 3Cr^2O^3 + 3O.$$

La modification de la gélatine (et des corps analogues tels que l'albumine, les gommes....,) résulte de l'union avec ce corps.

Voici comment on le prouve.

On prouve d'abord que la gélatine peut s'oxyder sans devenir insoluble. De la gélatine est immergée dans une solution concentrée de ferricyanure de potassium $(Fe^2Cy^{12})K^6$. Exposée à la lumière, *elle reste soluble*. Cependant on constate la présence de ferrocyanure $2(FeCy^6)K^4$, ce qui implique une mise en liberté d'oxygène, par suite une oxydation de la gélatine.

Réduisons le bichromate par l'acide tartrique. La réaction se fait à froid. Le liquide brunit avec formation de Cr^2O^3,CrO^3. Neutralisons par l'ammoniaque, immergeons de la gélatine, séchons, exposons à la lumière. *La gélatine est devenue insoluble.* Pourtant elle ne s'est pas oxydée, mais elle a pu fixer le chromate de chrome qui semble bien l'agent actif.

313. Papier positif direct au bichromate d'argent.

Nous venons de voir que du papier amidonné (ou couvert de corps analogues), puis imprégné de bichromate de potassium brunit à la lumière par formation de chromate de chrome. D'où le procédé suivant.

On recouvre le papier d'une solution contenant pour 100 grammes d'eau, 2 grammes de bichromate d'ammonium et 15 grammes de glucose. On fait sécher dans l'obscurité et l'on expose *sous un positif.*

Lorsque les parties exposées à la lumière sont devenues franchement grises, on plonge dans un bain contenant pour 100 grammes d'eau, 1 gramme d'azotate d'argent et 10 grammes d'acide acétique. L'image apparaît en sanguine; elle est constituée par du bichromate d'argent insoluble dans l'eau de lavage.

On peut la noircir en soumettant l'épreuve sèche au gaz acide sulfhydrique; il se produit du sulfure d'argent.

La théorie est très simple. Partout où passe la lumière, le bichromate est réduit et ne peut donner de sel d'argent. On obtient le sel d'argent sous les noirs du cliché qui par hypothèse est positif.

Photographie au charbon.

314. Description générale du procédé.

Nous venons de voir que *la gélatine ou l'albumine, préalablement traitées par le bichromate de potassium sont rendues par la lumière insolubles dans l'eau chaude.*

Une couche solide de gélatine ou d'albumine, contenant en suspension une poudre colorée ou noire (du charbon par exemple, d'où le nom du procédé), sensibilisée par l'action du bichromate, devient plus ou moins insoluble suivant l'action de la lumière. L'insolubilité se produit d'abord sur les couches exposées à la lumière ; elle gagne peu à peu les couches profondes ; cela, en raison même de l'opacité de la couche. La couche ne devient insoluble dans toute son épaisseur que si elle est très mince et que si l'action de la lumière est vive et d'assez grande durée.

Le procédé au charbon profite de cette insolubilité relative pour obtenir une couche d'épaisseur variable, par suite plus ou moins colorée suivant la profondeur de l'action lumineuse.

Une difficulté se présente. La couche a deux faces dont l'une adhérente au support. Quand on impressionne celle qui n'est pas au contact du support, les parties superficielles deviennent insolubles. Sous l'action de l'eau chaude, la gélatine se dissout *par-dessous* et quitte le support : le travail est perdu. Il faut donc toujours développer l'épreuve (faire agir l'eau chaude) en s'arrangeant de manière que la couche impressionnée, c'est-à-dire insolubilisée, soit *actuellement* en contact du support.

D'où la classification des procédés en *procédés sans transfert*, *à transfert simple*, *à double transfert*.

Nous obtenons en définitive des couches d'autant plus épaisses que la lumière est plus vive. Or, par une convention applicable à tous les dessins monochromes, lorsque à la place de charbon noir on utilise une poudre colorée, rouge par exemple (sanguine), les « noirs » sont censés d'autant plus intenses que la couche est plus épaisse. Nous devons donc impressionner la couche de gélatine avec un négatif ; après développement, les grandes épaisseurs de la couche correspondent aux « blancs » du négatif, par suite aux « noirs » de l'objet.

315. Procédés sans transfert.

1° — Epreuves au trait.

Premier cas très simple : les épreuves sont *au trait*, sans modelé ; la lumière peut agir sans inconvénient dans l'épaisseur entière de la couche jusqu'au support.

On trouve dans le commerce, sous le nom de *papiers mixtionnés*, des feuilles recouvertes d'une épaisse couche de *gélatine* mélangées d'une poudre noire ou colorée ; nous supposons qu'on les emploie, leur préparation régulière étant toujours difficile.

On les sensibilise par immersion dans une solution aqueuse de bichromate de potassium (2 à 6 p. 100).

Pour une même durée d'immersion et une même température, la sensibilité croît quand la richesse du bain augmente.

On fait sécher, on insole sous un négatif.

On prolonge l'insolation assez pour agir jusqu'au papier.

On développe en mettant la feuille dans de l'eau à 40°. Les parties non

insolées se dissolvent, entraînant la matière colorante. On facilite le départ avec un blaireau doux. On lave à l'eau froide et on sèche.

Le procédé est très simple; le temps d'insolation dont le choix, un des achoppements ordinaires de la méthode, n'a pas ici d'importance : il suffit qu'il dépasse un certain mininum.

2° — Epreuves modelées.

On utilise un support mince *transparent* (papier rendu transparent par une essence, collodion, mica,....).

Pour préparer la couche sensible, on met 150 grammes de gélatine dans un litre d'eau froide; on laisse gonfler plusieurs heures, puis on dissout au bain-marie. On ajoute 30 à 40 grammes de bichromate; on mélange la matière colorante ordinairement achetée à l'état pâteux. On coule sur le support, on laisse sécher dans l'obscurité.

On impressionne en appliquant le négatif sur le support transparent et non plus sur la couche sensible, de manière que les parties insolubles soient au contact du support. Après un temps d'exposition convenable, on développe dans l'eau à 40°. La gélatine soluble est enlevée; l'épreuve reste adhérente au support.

On met dans l'eau froide, on lave et on sèche.

316. **Procédé avec transfert simple.**

La couche impressionnée *gélatine en avant* est transportée sur un support définitif. C'est généralement une feuille de papier gélatiné dont la gélatine a été insolubilisée par de l'alun, ou du papier albuminé dont l'albumine a été coagulée par l'immersion dans l'alcool.

Le papier impressionné et le papier de transfert sont appliqués l'un sur l'autre sous l'eau, les gélatines en regard, et de manière qu'il n'y ait pas de bulles d'air. On les sort de l'eau, on les pose sur une glace, on chasse l'excès d'eau interposée avec un râteau sans dents : la pression colle le papier gélatiné à la couche sensible.

Ceci fait on développe dans l'eau à 40°. Le papier qui supportait la couche sensible, se décolle; on procède ensuite comme plus haut.

En place de papier, on peut prendre une glace comme support définitif. On la recouvre de gélatine pour qu'il y ait adhérence; la gélatine est alunée pour qu'elle ne se dissolve pas lors du développement.

Nous sommes partis d'un négatif pour impressionner la gélatine bichromatée : l'épreuve que nous obtenons, est positive et retournée par rapport au négatif, donc droite.

Le transfert fournit donc une image positive mais retournée.

Par conséquent, à moins d'avoir retourné le négatif pour obtenir le positif sur papier mixtionné, notre résultat est incomplet.

317. **Procédé par double transfert.**

D'où la nécessité d'un second transfert qui redresse l'image : le premier donne à l'épreuve un support provisoire, le second lui donne un support définitif.

Comme support provisoire, on utilise une glace recouverte d'une mince couche empêchant l'adhérence trop grande de la gélatine.

On prépare la solution :

Benzine	Cire	Résine
100 cm³.	1 gr.	0,15 gr.

On imbibe un chiffon de quelques gouttes de cette solution, on étend sur le verre bien nettoyé.

Quand la benzine est évaporée, on polit avec une flanelle.

Le papier mixtionné impressionné est mouillé et appliqué dans l'eau froide sur la glace préparée. On retire de l'eau, on enlève l'excès d'eau avec un râteau sans dents. On développe dans l'eau à 40°.

Le support de la couche impressionnée se décolle.

Le développement terminé, il s'agit de passer un support définitif. C'est généralement un papier gélatiné qu'on applique comme ci-dessus (§ 316). On laisse sécher. Quand l'épreuve est sèche, elle se détache aisément du support provisoire.

Il existe une infinité de recettes; mais pour fixer les idées du lecteur et lui permettre d'obtenir des résultats, ce qui précède suffit. Les débutants barbotent ordinairement dans un détail, nécessaire aux techniciens accordons-le, mais inutile pour obtenir une épreuve acceptable. Qu'ils soient persuadés qu'on réussit habituellement du premier coup.

318. **Papier à la gomme arabique.**

Il est incommode d'avoir à impressionner par derrière, les transferts sont toujours délicats. On a donc étudié des papiers dits *à impression directe* qu'on insole par devant et desquels la couche sensible ne se détache pas par développement. Le plus simple est à base de gomme bichromatée; sa préparation et son utilisation sont d'une extrême simplicité; s'il est difficile de réaliser un chef-d'œuvre, il ne l'est pas d'obtenir une image.

On met dans un morceau de mousseline à cataplasme 40 grammes de gomme arabique ordinaire; on fait dissoudre dans ~~60 grammes~~ d'eau. La mousseline sert de filtre. Pour éviter la fermentation, on ajoute 2 p. 100 de formol; il est préférable d'utiliser la solution fraîche.

On fait une solution de bichromate (potassium ou ammonium à 10 p. 100). Au moment de s'en servir, on mélange 2 volumes de solution gommeuse pour un volume de solution bichromatée. On ajoute le colorant sous forme de couleurs molles d'aquarelle qu'on mélange intimement.

Voici les pigments les plus usitées.

Noirs.	Noir de bougie, bistre.
Bruns.	Brun van Dyck, terre de Sienne brûlée, sépia.
Rouges.	Rouge de Venise, brun rouge.

L'étendage de la gomme se fait au moyen de pinceaux plats (brosses de peintre) en soie de porc et qui puissent résister à l'eau (ils sont ordinairement faits pour la peinture à l'huile); l'un de 3 centimètres de large sert à barbouiller le papier, l'autre de 8 centimètres sert à égaliser et à sécher.

Comme papier on prend du papier blanc à dessin peu encollé (Lalanne, Ingres, d'office).

En général on insole sous un négatif avec comme support un papier blanc. Il est possible d'insoler sous un positif avec un support noir; de préférence, le pigment est alors du sulfate de baryte.

Le *couchage* (qui se fait en plein jour) consiste à étendre une couche régulière et fine de gomme. On sèche dans l'obscurité, au-dessus d'une plaque de fonte légèrement chauffée; le papier doit être assez sec pour qu'il commence à s'enrouler.

On pose sous un négatif, d'un quart d'heure à plusieurs heures suivant la saison. Le plus simple est de préparer un bout de papier témoin couvert de gomme bichromatée *sans pigment coloré:* il noircit à la lumière (§ 312). On le cache entre deux bouts de carton; on en fait sortir un centimètre. Quand ce morceau est noir, on tire un autre centimètre, et ainsi de suite, marquant un *point* chaque fois.

Suivant la nature et la concentration du pigment, on pose un nombre de *points* indiqués par l'expérience.

Le développement normal se fait à l'eau froide. L'épreuve est placée sur l'eau face en dessous; on la retire toutes les deux minutes pour vérifier l'effet obtenu. Si elle est surexposée (la gomme est rendue quasi insoluble), rien ne vient même après une heure; on élève la température de l'eau jusqu'à 30°.

Mais, et c'est ici que les artistes ont beau jeu, on peut développer *au pinceau*, c'est-à-dire frotter la surface avec un blaireau, une brosse de soie de porc, un tampon d'ouate, une éponge,... de manière à modifier du tout au tout l'aspect de l'épreuve. Dans le procédé que nous étudions, la gomme devient plus ou moins insoluble *dans toute son épaisseur*; en frottant, on active la dissolution au prorata de la solubilité. Du reste le pinceau permet le dépouillement local.

Dans leur petit livre, Maskell et Demachy donnent des conseils au futur « gommiste » sur la manière de procéder : nous y renvoyons le lecteur qui rêve un chef-d'œuvre.

Ils indiquent une méthode de *couchage* qu'il est bon de signaler.

On sensibilise le papier par badigeonnage avec la solution de bichromate; on laisse sécher dans l'obscurité, puis (toujours dans l'obscurité) on étend la couche de gomme colorée à laquelle on ajoute un tiers d'eau pour faciliter le couchage. Le reste comme précédemment.

Le papier ainsi préparé est plus sensible que l'autre.

L'obscurité dont il est ci-dessus parlé, peut n'être que très relative, la préparation gommeuse étant peu sensible.

Pour fixer l'épreuve (faire disparaître les dernières traces de sels de chrome) on lave un quart d'heure dans un bain très étendu de bisulfite de sodium.

On lave à l'eau, on passe au formol à 10 p. 100, on lave, on sèche, on vernit.

Rien n'empêche (avant de vernir, bien entendu) de recouvrir l'image d'une seconde couche de gomme bichromatée et colorée, et de recommencer; ce qui revient à superposer à la première une seconde épreuve obtenue avec le même négatif, qui peut être de même couleur ou de couleur différente. Le « gommiste » trouve là le moyen de satisfaire ses instincts de découverte artistique. Bien entendu le procédé n'a aucun rapport avec le procédé classique aux trois couleurs (§ 339) puisque le même cliché sert à obtenir les diverses couches colorées. Maskell et Demachy conseillent donc de ne pas essayer l'imitation des couleurs naturelles (voir la préface de leur ouvrage).

Procédés par moulage.

Les divers procédés par moulage utilisent les propriétés de la gélatine insolée dans l'eau froide ou dans l'eau chaude.

Rappelons qu'elle ne s'imbibe pas, par suite ne gonfle pas *dans l'eau froide*, qu'elle ne se dissout pas *dans l'eau chaude*.

319. **Moulage après développement dans l'eau froide (hélioplastie de Poitevin).**

1° — Il s'agit d'obtenir des planches en creux, dans le genre des gravures au burin ou à l'eau forte (voir chapitre VIII). Dans l'obscurité on coule sur une glace une solution de gélatine bichromatée d'autant moins épaisse que les traits à reproduire sont plus fins. On laisse sécher.

On impressionne sous un positif retourné pendant quelques minutes au soleil. On laisse la plaque refroidir et on la plonge dans l'eau *froide* : on voit apparaître en relief toutes les parties où la gélatine a été protégée contre l'action de la lumière. Les parties insolées qui correspondent aux blancs du dessin n'absorbent pas l'eau et restent en creux.

2° — Pour mouler cette surface, on emploie le plâtre ou la galvanoplastie.

a) Pour le moulage au plâtre, la gélatine *gonflée* est traitée par une solution de sulfate ferreux qui la *tanne* et l'empêche d'adhérer au plâtre. On l'égoutte; on la cale de niveau, on l'entoure de réglettes de verre et on coule du plâtre fin, gâché (plâtre de mouleur). On laisse prendre, on enlève les réglettes et on retourne sur une mince couche d'eau. L'eau pénètre le plâtre, arrive jusqu'à la gélatine et facilite le démoulage. On peut recommencer l'opération plusieurs fois.

b) On obtient par la galvanoplastie, soit directement un contre-moule en métallisant la gélatine, soit indirectement, à partir du plâtre, en

faisant un autre moule de gutta qui sert à obtenir le cliché galvanique (voir le troisième volume de mon Cours d'Électricité).

320. **Hydrotypie (Cros).**

Rapprochons de l'hélioplastie le procédé très simple *par imbibition*, connu sous le nom d'*hydrotypie*. Il est basé comme le précédent sur les changements de perméabilité de la gélatine pour l'eau *froide*.

Pour un simple essai (que nous conseillons vivement au lecteur; il lui montrera l'essentiel des procédés à la gélatine), on prend comme point de départ une plaque au gélatinobromure qu'on traite par l'hyposulfite de sodium, qu'on lave et qu'on fait sécher. Au reste c'est une bonne manière d'utiliser les plaques voilées accidentellement (§ 288).

On sensibilise avec un bain de bichromate à 3 p. 100, dans l'obscurité et pendant 3 à 5 minutes.

On lave rapidement pour enlever l'excès de bichromate et on sèche.

On expose sous un positif. La gélatine devient imperméable sous les clairs du positif, elle reste perméable sous ses noirs.

On rentre dans le laboratoire, on lave pour éliminer l'excès de bichromate; on sèche. Enfin on développe l'image en plongeant dans un bain coloré. Pendant cette opération, la gélatine gonfle dans les parties non insolées. Voici les colorants usuels :

Rouge.	Carmin, fuchsine, éosine.
Jaune.	Acide picrique, picrates alcalins.
Bleu.	Bleu d'aniline.

On lave rapidement et on fait sécher.

Pendant qu'elle sèche, la couche redevient plane, en conservant naturellement ses différences locales de coloration.

On peut soumettre à l'hydrotypie de vieux négatifs dont on efface l'image avec une solution contenant pour 100 d'eau, 10 de prussiate rouge et 10 d'hyposulfite de sodium. On lave et on sèche.

321. **Moulage après développement dans l'eau chaude (photoglyptie, Woodbury).**

1° — La photoglyptie est un procédé de tirage mécanique des épreuves au charbon. Quel que soit son intérêt industriel, son intérêt théorique et pédagogique est grand comme montrant ce qu'on peut demander de résistance à une épreuve sur gélatine.

Le procédé consiste à obtenir une pellicule de gélatine bichromatée, insolée, développée à chaud, portant par conséquent l'image en relief.

On obtient un moulage de ce relief sur des feuilles de plomb de 6 millimètres d'épaisseur, pressées contre la pellicule entre deux plaques d'acier.

On réalise donc en creux le relief de la gélatine sur une substance dure et insoluble. On pose la planche en creux sur une presse, on verse

dessus de la gélatine colorée, on recouvre d'un papier satiné, on comprime. La gélatine remplit le creux, l'excès sort par les bords.

On laisse à la gélatine le temps de se figer; on enlève l'épreuve : elle est semblable à une épreuve au charbon. L'avantage industriel par rapport au procédé au charbon est de donner autant qu'on le désire, d'épreuves identiques et inaltérables.

Revenons sur quelques points de notre description.

2° — Il est d'abord nécessaire d'obtenir une *pellicule* de gélatine.

Pour cela on collodionne à plusieurs reprises une glace talquée; on la recouvre de gélatine bichromatée. On dessèche dans une boîte contenant du chlorure de calcium et on enlève la pellicule.

On insole sous un négatif comme pour la photographie au charbon, en plaçant contre le cliché la face collodionnée. Pour le développement, on se sert comme support provisoire d'une glace recouverte d'une solution de caoutchouc dans la benzine qu'on laisse sécher jusqu'à ce qu'elle soit poisseuse. On applique dessus la pellicule impressionnée, le collodion face au caoutchouc. On l'y fait adhérer en roulant dessus un tube de caoutchouc.

On développe à 50° jusqu'à dissolution de la gélatine restée soluble. On traite par une solution d'alun, on lave, on sèche.

On arrache avec précaution : le moule pelliculaire est prêt.

3° — Nous avons dit que le contre-moule est en plomb. La pression nécessaire est de 45 kilogs par centimètre carré. Une plaque de $15 \times 20 = 300$ centimètres carrés exige donc une force totale de 13 500 kilogs, une plaque de $30 \times 40 = 1\,200$ centimètres carrés exige une force totale de 54 000 kilogs.

Elle est fournie par une presse hydraulique.

Connaissant le diamètre du piston et la surface à comprimer, il est facile de calculer le nombre d'atmosphères auquel doit monter la pression.

Le moulage se fait entre deux plaques d'acier épaisses et planes; contre le pourtour de l'inférieure on fixe avec des boulons quatre barres d'acier légèrement débordantes qui forment avec elle une cuvette plate. Dans cette cuvette entre juste la plaque supérieure. La feuille de plomb qui est très peu plus grande que les plaques d'acier, est ainsi comprimée sans variation d'aire; elle s'étendrait nécessairement sans l'encadrement : la pellicule serait déchirée.

On pose la pellicule de gélatine, le collodion contre la plaque inférieure d'acier; on recouvre de la feuille de plomb, puis de la plaque supérieure d'acier. On comprime. On maintient la pression quelques minutes. On décomprime, on dévisse les boulons; on sort le moule en plomb.

4° — Pour le tirage on se sert de papier épais qu'on doit fortement encoller pour le rendre imperméable à la solution chaude de gélatine servant à l'impression. Pour cela on l'imprègne d'une solution de

gomme laque à laquelle on ajoute du borax et du carbonate de sodium. On satine pour boucher les pores; c'est dire qu'on lamine entre deux feuilles de zinc ou d'acier.

L'encre photoglyptique est une solution de gélatine dans l'eau à laquelle on ajoute des matières colorantes. Le moule posé sur la presse et bien calé est graissé avec un tampon de flanelle pour que l'épreuve n'y adhère pas. On y verse de l'encre liquéfiée par fusion vers 30°; on applique le papier. On exerce la pression; on attend 5 à 10 minutes et on démoule. Pour ne pas perdre de temps, l'ouvrier utilise successivement quatre presses placées les unes à côté des autres.

La presse est du genre *à plateau* : c'est un plateau horizontal qu'on abaisse et qu'on applique avec un levier.

322. **Emploi de la galvanoplastie.**

1° — Le procédé suivant présente le grand avantage de ne pas nécessiter l'emploi d'une presse hydraulique.

On part d'un négatif. On utilise du papier au charbon, mixtionné spécialement pour la photoglyptie. Il est analogue au papier mixtionné ordinaire (§ 315), mais sa coloration est faible et la couche de gélatine est plus épaisse.

On sensibilise au bichromate de potassium ; on fait sécher.

On insole en appliquant le négatif sur la couche de gélatine.

La couche de gélatine insolée est appliquée contre la glace qui doit lui servir de support. Pour faciliter l'adhérence, celle-ci est doucie, ou recouverte d'une couche de collodion. L'application se fait dans l'eau froide. On sort de l'eau, on chasse l'excès d'eau avec un râteau. On développe dans l'eau à 50°. Le papier s'enlève d'abord, puis la gélatine non insolée se dissout. On retire, on laisse sécher.

Le moule est alors obtenu : les parties rendues insolubles par la lumière, celles par conséquent qui correspondent aux blancs du négatif, aux noirs de l'objet, sont en relief.

2° — Le contre-moulage se fait ici avec une feuille d'étain.

Pour cela on graisse la gélatine avec une flanelle frottée de suif, on étend la feuille d'étain, on couvre de quelques épaisseurs de papier buvard, on comprime entre deux cylindres. En allant progressivement on évite le bris de la glace qui sert de support.

On donne de la consistance au contre-moule par cuivrage galvanoplastique. Quand l'épaisseur du cuivre est suffisante, on fixe le contre-moule sur une glace au moyen d'un mélange de résine et de gomme laque. On sépare le moule du contre-moule.

Le tirage des épreuves se fait comme plus haut.

Procédés par saupoudrage.

323. **Procédé par saupoudrage.**

Le procédé a pour base l'action des bichromates alcalins sur le sucre, la glucose, le miel..., substances hygroscopiques dans leur état habituel. Bichromatées, elles perdent cette propriété sous l'action de la lumière, de même que la gélatine cesse d'absorber de l'eau à froid.

Préparons la solution suivante :

Eau	Gomme arabique	Sirop de glucose	Solution saturée de bichromate
100 gr.	5 gr.	5 gr.	15 à 20 cm³.

Le bichromate d'ammonium est préférable.

Sur une glace parfaitement propre étendons cette solution comme pour le collodion; séchons dans l'obscurité à une douce chaleur sur la flamme d'une lampe à alcool. Exposons aussitôt sous un positif dans le châssis-presse. Le temps de pose est de 30 secondes au soleil, de 5 à 10 minutes à l'ombre.

Rapportons le cliché dans le laboratoire éclairé à la lumière rouge. Peu à peu la couche sensible absorbe l'humidité de l'air; l'image apparaît sous l'incidence oblique. A un instant qu'indique l'expérience, à l'aide d'un blaireau prenons une poudre (émail, voir plus loin) et tamponnons la couche. La poudre se fixe aux points où la couche est restée hygrométrique (points protégés par les noirs du positif) et n'adhère pas aux points modifiés par la lumière (blancs du positif).

Si la pose a été trop longue, la poudre n'adhère nulle part; trop courte, elle adhère partout.

L'image créée par la poudre (de charbon ou tout autre poudre colorée) est donc d'autant plus pâle que l'exposition a été plus longue; c'est l'inverse de ce qu'on obtient d'habitude.

D'autre part si on procède trop tôt au saupoudrage, la couche n'a pas fixé assez de vapeur d'eau : la poudre ne prend pas. Si on attend trop longtemps, il y a empâtement. Il vaut cependant mieux se hâter.

Conséquemment par temps sec, posez la glace après son entier refroidissement et attendez quelques minutes pour développer; en effet la vapeur se fixe d'autant mieux que la glace est plus froide. Par temps humide, insolez la glace non refroidie et développez sans attendre.

On obtient donc ainsi une image *par saupoudrage.*

Mais précisément à cause des propriétés hygrométriques du support, il faut exécuter un transfert.

324. **Emaux photographiques.**

Plaçons-nous dans le cas habituel où le procédé du paragraphe précédent sert à obtenir des émaux.

Rappelons d'abord de quoi il s'agit.

1° — *Émailler* c'est recouvrir à chaud d'une couche vitrifiable. L'émail *blanc* ordinaire est un verre à base de plomb, rendu opaque par de l'oxyde d'étain SnO^2 (étain calciné à l'air, *potée d'étain*) qui donne du stannate de plomb non fusible. Il est employé pour recouvrir des plaques de cuivre ou de fer, des casseroles, des objets de toilette, des abat-jour... Voici une formule d'émail blanc :

Silice	Carbonate de potassium	Minium	Oxyde d'étain
30 gr.	20	40	10

L'émail noir contient des oxydes de manganèse, de fer et de cobalt.

Pous obtenir des émaux colorés on introduit divers oxydes; en voici quelques-uns pour fixer les idées.

Rouge.	Oxyde de fer, oxyde de cuivre.
Jaune.	Chromate de plomb, sulfate de fer, oxyde de zinc.
Vert.	Oxydes de chrome, de cuivre et de cobalt mélangés.
Bleu.	Oxyde de cobalt.
Violet.	Oxyde de manganèse.

Supposons avoir saupoudré le cliché avec des poudres d'émail (verre coloré finement broyé), c'est-à-dire des poudres capables de fondre et de se fixer par la chaleur sur des plaques d'émail blanc.

Il s'agit de transporter l'image sur une telle plaque.

2° — Transport de l'image et fusion de l'émail.

On utilise pour cela du collodion épais (2 grammes de coton-poudre dissous dans 50 grammes d'alcool et 50 grammes d'éther). On en recouvre le cliché; on attend quelques minutes, on immerge dans l'eau froide acidulée à 5 p. 100 par l'acide sulfurique (pour chasser le sel de chrome). On retire de l'eau acidulée après quelques minutes, on coupe le collodion sur les bords, on replonge dans l'eau pure : la pellicule se détache entraînant toute la poudre.

La pellicule bien lavée est appliquée sous l'eau (sucrée à 10 p. 100) contre la plaque d'émail, poudre en dessus. On tamponne, on retire, on sèche.

Il ne reste plus qu'à faire cuire au fourneau d'émailleur.

325. Gravure au mercure.

Sur un carton ou sur une tôle mince dressée, on étend la solution suivante analogue à celle du § 318 :

Eau	1 000	Gomme	30	Glycérine	20
Albumine	300	Sucre candi	20	Bichromate d'ammonium	50

On sèche dans l'obscurité au-dessus d'une plaque de fonte légèrement chauffée. On insole sous un cliché pendant 5 minutes. On passe dans un bain tiède : les parties non insolées sont poisseuses; les parties insolées sont devenues imperméables.

Avec un pinceau mou, on étend une poudre fine composée des trois sels de mercure :

Biiodure	Cyanure	Chromate
40 gr.	50 gr.	10 gr.

On applique sur la plaque de cuivre ou de zinc qu'il s'agit d'amalgamer. On charge de poids et on laisse 12 heures. Nous verrons au § 414 comment on utilise les dessins dont les traits sont ainsi reproduits en amalgame.

CHAPITRE V

PROCÉDÉS ET ACTIONS DIVERSES

Daguerréotypie et procédés analogues.

Le procédé de Daguerre est mort et bien mort; je ne songe pas à le faire revivre. Il n'en est pas moins pédagogiquement intéressant, *à la condition de le simplifier le plus possible.*

326. **Daguerréotypie.**

Le procédé de Daguerre donne immédiatement un positif.

Le substratum des opérations est une couche mince d'argent. On utilise du cuivre plaqué d'argent qu'on trouve dans le commerce, ou plus simplement une glace argentée comme il est dit dans notre Cours sur *la Construction,...*

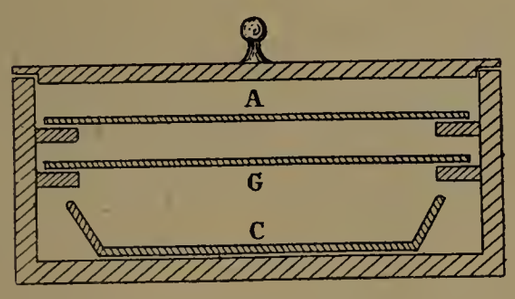


Fig. 236.

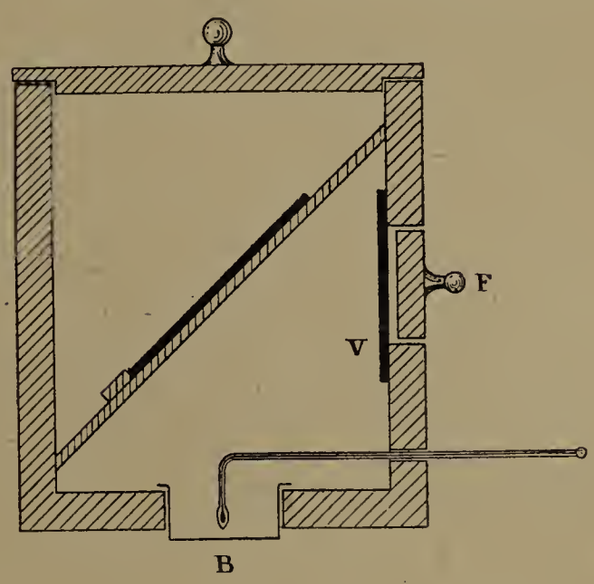


Fig. 237.

Il faut polir avec soin la couche d'argent d'abord avec un tampon de coton imbibé d'alcool, puis avec une peau de chamois enduite de rouge d'Angleterre très fin.

Pour former la couche sensible, on expose l'argent dans l'obscurité à la vapeur d'iode. On se sert commodément d'une boîte dont la figure 236 représente la coupe. En C est une cuvette de porcelaine sur laquelle on éparpille des fragments d'iode. En G est une glace servant de cloison et qu'on enlève comme un tiroir par une rainure creusée dans le côté avant

de la boîte. En A est la couche d'argent supportée par ses angles ; le tout est recouvert d'un couvercle.

On met l'iode dans la cuvette; on ferme la cloison. On dispose la plaque argentée, on ferme le couvercle et on tire la cloison. L'argent s'iodure et devient successivement jaune, rouge, violet, blanc et vert. Il faut aller jusqu'au rouge exclusivement, ce qui demande 2 à 3 minutes. Rien n'empêche d'arrêter l'opération en poussant la cloison et de regarder la couche d'argent un temps très court à une faible lumière.

Daguerre bromurait aussi la plaque, l'iodure d'argent étant peu sensible; mais je limite le procédé à l'essentiel.

Comme la couche d'iodure obtenue est peu sensible et qu'il ne s'agit ici que de fixer nos idées, nous l'impressionnerons par contact sous un cliché positif.

L'insolation est assez longue, de 5 à 10 minutes à la lumière diffuse.

Le développement s'effectue à la vapeur de mercure dans une boîte close de forme convenable. Le mercure est dans la cuvette de fer B; on le chauffe vers 60°; un thermomètre coudé donne la température. La plaque insolée est posée, iodure en bas, sur des coulisses à 45°. Pour regarder où en est le développement, on ouvre la fenêtre F et l'on voit la surface sensible à travers un verre jaune V. On éclaire avec une bougie.

Le développement dure quelques minutes.

La vapeur de mercure agit probablement comme réducteur sur l'iodure impressionné, puis forme un amalgame avec l'argent réduit. Les parties qui ont reçu la lumière apparaissent en blanc mat *diffusant* sur fond miroitant qui joue le rôle de fond noir. D'où l'emploi d'un positif pour impressionner.

La plaque est fixée dans l'hyposulfite de sodium qui dissout l'iodure d'argent.

Tel est, réduit à l'essentiel, le procédé si célèbre de Daguerre; il constitue une très jolie manipulation.

Ainsi dans le procédé de Daguerre, ce sont non pas les oppositions de teintes qui produisent l'image, mais les variations de pouvoirs diffusifs. Les daguerréotypes changent donc considérablement d'aspect suivant l'incidence de la lumière qui les éclaire, au point que pour certaines incidences, de positifs ils peuvent devenir négatifs. On les comparera à l'image obtenue avec de la gouache sur un miroir. En même temps que l'image, apparaissent nécessairement *sur les noirs* les reflets des objets environnants.

Comme inconvénients du procédé, signalons que l'image est *retournée* (§ 280), qu'elle est unique, enfin que la plaque d'argent se sulfure à l'air d'une manière inégale; la sulfuration peut même envahir les *blancs*, c'est-à-dire les parties amalgamées diffusantes.

On peut virer l'épreuve au moyen d'un bain d'or (1 gramme de chlorure d'or dans 500 grammes d'eau distillée qu'on verse dans une solution de 4 grammes d'hyposulfite de sodium dans le même poids d'eau).

On met la plaque de niveau, on recouvre la solution d'or et, chauffant par dessous, on porte à l'ébullition. L'or forme un amalgame qui rend les *blancs* plus diffusants; il donne une teinte plus chaude à la surface d'argent non amalgamée.

Le dépôt d'or obtenu, on plonge brusquement la plaque dans l'eau froide. Son éclat et sa stabilité augmentent par le virage.

327. **Procédé galvanoplastique de Poitevin.**

1° — Faisons un daguerréotype sur plaqué d'argent par la méthode ci-dessus décrite, en iodurant jusqu'au violet foncé. Développons au mercure; *mais ne fixons pas.*

L'expérience montre que les parties insolées blanches formées par l'amalgame d'argent sont devenues conductrices pour le courant électrique, tandis que l'iodure d'argent ne l'est pas.

Prenons la plaque comme catode d'une cuve électrolytique pleine d'une solution de sulfate de cuivre : le cuivre se dépose sur les parties amalgamées (blanc et demi-teintes); il épargne les parties miroitantes qui jouent le rôle de noirs.

De blanc le daguerréotype devient rouge.

Arrêtons le courant quand le résultat paraît convenable, sans quoi la couche de cuivre finirait par devenir continue.

L'opération peut se faire en pleine lumière, le chlorure d'argent ne devenant pas conducteur sous l'influence de la lumière. Elle est infiniment remarquable.

2° — Obtention d'un négatif.

Mais voici mieux.

Lavons la plaque à grand eau pour la débarrasser du sulfate de cuivre; fixons à l'hyposulfite, lavons et séchons.

Coulons de la gélatine sur le cuivre; laissons sécher. Le cuivre n'adhérant que très faiblement à la surface de l'argent, s'en détache aisément. La gélatine sèche se décolle, entraînant le cuivre et donnant une image transparente, négative, qui peut servir pour tirer des positifs sur papier.

C'est ainsi que Poitevin parvint à reproduire les daguerréotypes.

Modification des corps en couches minces.

328. **Variation de résistance sous l'action de la lumière. Photophone.**

1° — Sélénium.

La conductibilité électrique du sélénium *cristallisé* diminue lorsqu'on l'expose à la lumière. L'effet varie beaucoup suivant l'état physique. En portant le sélénium amorphe vers 210° et en prolongeant l'action de

cette température, on obtient une variété cristalline à grains grossiers dont la résistance est assez faible dans l'obscurité (de l'ordre de celle des métaux mauvais conducteurs), mais devient jusqu'à dix fois moindre sous l'influence des rayons solaires. La lumière diffuse la diminue de moitié. Ces nombres ne sont que pour fixer les idées.

La variation croît moins vite que proportionnellement à l'intensité de la lumière. La partie violette du spectre semble avoir un effet prépondérant. Les rayons calorifiques obscurs n'ont d'autre action qu'un échauffement, et *tout échauffement augmente la résistance.*

Quand on supprime la lumière, la conductibilité reprend assez lentement sa valeur première. Par exemple une surface de sélénium dont la résistance était de 258 000 ohms dans l'obscurité et était devenue 200 000 sous l'influence de la lumière, présentait les résistances suivantes pour des temps t en secondes après la suppression de la lumière :

$t =$	1^s	2^s	3^s	4^s	5^s	6^s
	222	232	239	244	248	252

2° — Sulfure d'argent.

On réalise une couche mince de sulfure d'argent (épaisseur de l'ordre de 10 μ) en sulfurant une lame d'argent pur par électrolyse du sulfure de sodium en solution étendue. En chauffant un point de la lame d'argent, on détache la lame de sulfure qu'on place sur une feuille d'amiante. Les électrodes sont des lames d'argent solidement serrées contre la lame de sulfure.

La résistance est de l'ordre de 10 000 ω.

La lame est sensible à toutes les radiations de l'infra-rouge à l'ultraviolet.

3° — Emploi comme transmetteur téléphonique.

De cette propriété résulte la possibilité de constituer un transmetteur téléphonique avec une lamelle S des corps précédents. Intercalons-la dans un circuit contenant une pile et le primaire d'un transformateur dont le secondaire est relié à un téléphone. Envoyons sur S un faisceau lumineux variable ou intermittent. A chaque période de l'éclairement correspond une période de la résistance, une période du courant primaire, une période du secondaire et une période du mouvement du disque de fer. Le faisceau lumineux périodique est obtenu au moyen d'un disque percé de trous qui intercepte les rayons émis par une source intense.

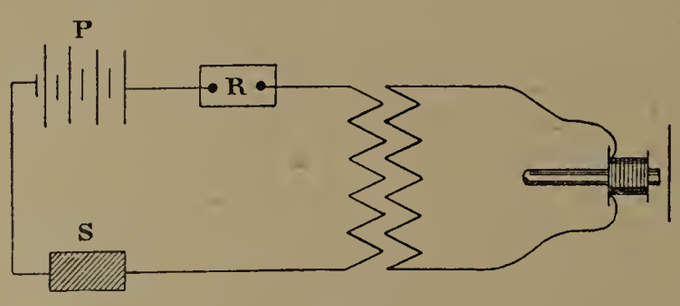


Fig. 238.

De ce qu'on entend un son dans le téléphone, il ne faut pas conclure que la résistance revient à sa valeur normale aussitôt que cesse l'éclai-

rement : l'expérience directe montre pertinemment le contraire. Il faut conclure que la résistance subit une variation qui peut n'être qu'une très petite fraction de la variation totale.

Les minimums et maximums de la résistance sont probablement décalés par rapport aux maximums et minimums de l'éclairement.

Le phénomène *qui est du type à hystérésis* (voir la préface de ce volume) exigerait une étude systématique, consciencieuse et intelligente.

329. **Thermophone.**

Disons quelques mots de la thermophonie pour permettre au lecteur de classer tous ces phénomènes.

Il s'agit ici purement et simplement d'une action calorifique.

1° — On envoie sur une lame mince quelconque un faisceau lumineux intermittent; cette lame placée contre l'oreille (ou encore agissant par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc) donne un son dont la hauteur égale la fréquence de l'éclairement périodique.

La lame L repose sur une portée ménagée dans un cornet de bois. Elle est maintenue par une pièce cylindrique qui entre à frottement autour du cornet; elle n'a pas besoin d'être encastrée solidement.

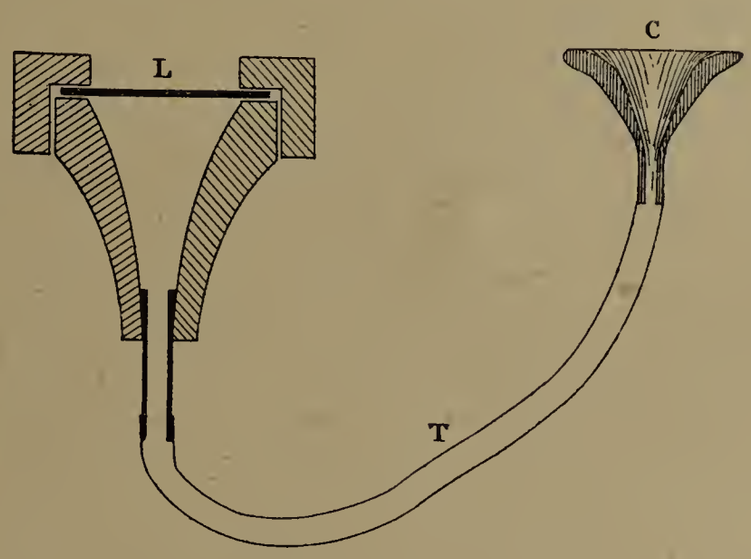


Fig. 239.

Pour que les effets soient notables, la lame doit être mince si elle est opaque; on peut utiliser des feuilles de cuivre, d'aluminium, de platine, de zinc, dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,1 mm.; on remarquera qu'elles sont conductrices de la chaleur. Si la lame est transparente (c'est-à-dire non conductrice), l'épaisseur n'influe pas sensiblement sur l'intensité du phénomène.

La lame n'intervient pas par ses propriétés élastiques; une lame fendue donne les mêmes effets qu'une lame intacte.

Quand on recouvre les lames opaques de céruse ou de blanc de zinc, les effets sont annulés; ils sont exagérés avec le noir de fumée : la couche noire doit être sur la face qui reçoit les rayons.

Pour les corps transparents, la couche noire doit être du côté de l'oreille.

Les radiations les plus actives sont les calorifiques (rouges et infrarouges). Tout s'explique en admettant que les radiations servent à

échauffer périodiquement la couche d'air qui est au contact de la lame réceptrice. D'où dilatations périodiques de cette couche et production du son.

2° — Pour mettre hors de doute cette explication, on réalise des expériences très simples.

Un tube de verre est bouché au moyen d'un piston P déplaçable; il

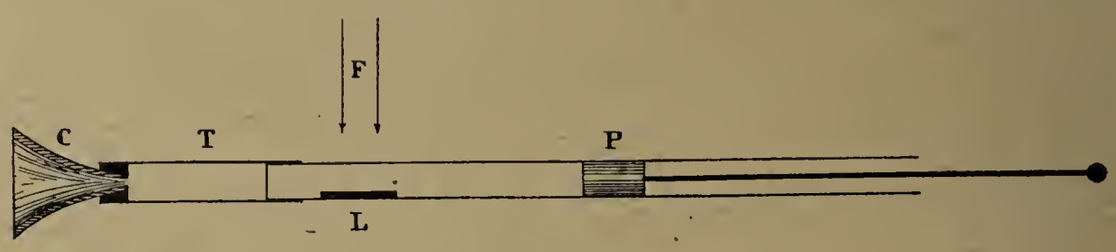


Fig. 240.

est relié par un tube T au cornet acoustique C. Il reçoit le faisceau intermittent F. Si le tube est vide, on n'entend rien. Mais un son se produit dès qu'on introduit un demi-cylindre L d'une substance quelconque, papier, mica, métal,... *enfumé*, ou encore si on enfume le verre *intérieurement*.

Si le verre est enfumé *extérieurement*, rien ne se produit.

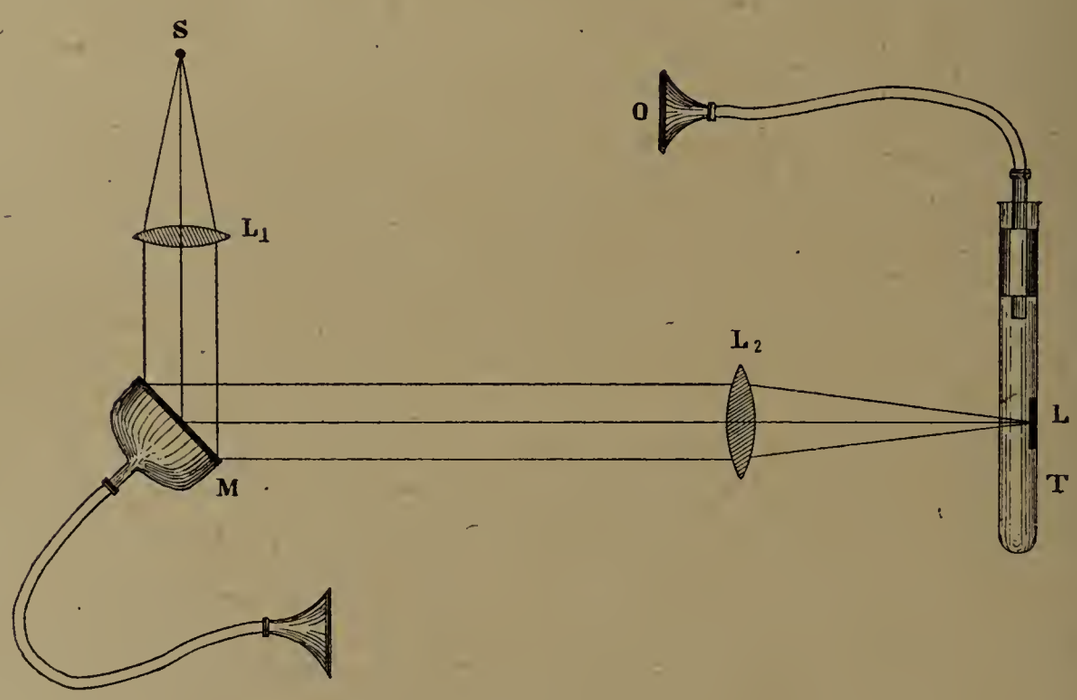


Fig. 241.

En déplaçant le piston, on peut accorder le tuyau sur le son dont la fréquence est celle des variations du faisceau lumineux. Le phénomène est considérablement amplifié. D'où une méthode très simple d'exciter un son dans un tuyau entièrement clos.

3° — On peut baser un transmetteur téléphonique sur ces expériences. La figure 241 représente schématiquement le montage de l'appareil.

Les rayons émis par la source ponctuelle S sont rendus parallèles par

la lentille L_1, sont réfléchis sur un mince miroir plan M, rendus convergents par la lentille L_2; ils tombent enfin sur un demi-cylindre enfumé contenu dans le tube de verre T. On écoute en O.

Le miroir, formé par une lame mince de verre argentée, est monté de manière qu'il soit déformé quand on parle dans l'embouchure B.

330. Production d'une force électromotrice par la lumière.

1° — L'actinomètre électrique semble d'abord résoudre d'une manière aussi simple que précise la mesure des éclairements. Malheureusement bien qu'un grand nombre de travaux lui aient été consacrés, il est loin de réaliser le photomètre rêvé.

Il se compose de deux lames A et B du même métal dont une des faces est couverte d'un vernis isolant et dont l'autre est modifiée *autant que possible de la même manière*. Les lames sont plongées dans un électrolyte et reliées à travers une forte sistance R (20 000 ω par exemple) à un galvanomètre sensible jouant le rôle de voltmètre G.

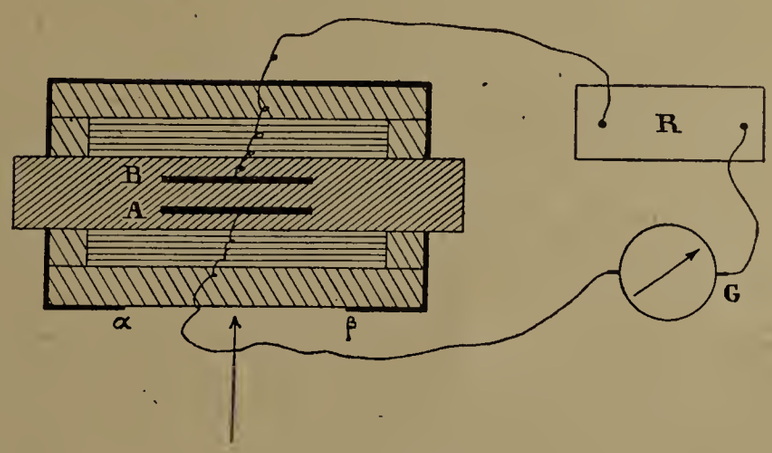


Fig. 242.

L'électrolyte est contenu dans une cuve à glaces parallèles (vue en projection horizontale dans la figure 242), recouverte extérieurement d'un vernis opaque (solution alcoolique de gomme laque tenant en suspension du noir de fumée). Une bande αβ est laissée libre; elle permet d'éclairer entièrement la face sensible de la lame A. Celle de la lame B est protégée par la lame A ou par un écran quelconque.

Si les faces modifiées de A et de B le sont exactement de la même manière, par raison de symétrie la force électromotrice de la pile qu'elles constituent est nulle dans l'obscurité.

L'expérience montre qu'elle ne l'est plus si l'une des faces est éclairée.

Tous les systèmes de deux lames identiques plongées dans un électrolyte quelconque forment un actinomètre. Etudions ceux qui donnent les résultats les plus énergiques et les plus réguliers. Pour déterminer les effets de chaque radiation, on forme un spectre pur réel le long duquel on déplace l'actinomètre. La lame qui reçoit la lumière est alors prise très étroite (2 mm. par exemple). Pour la régularité des phénomènes elle doit être uniformément éclairée, *en son entier*. Régler l'intensité du courant en faisant varier l'*aire* éclairée, est une méthode incorrecte, la force électromotrice de l'élément ayant alors une valeur apparente mal définie.

2° — Actinomètre en argent chloruré.

Le procédé le plus simple pour chlorurer les lames d'argent consiste à les polir, à les décaper, puis à s'en servir comme d'anodes dans une cuve électrolytique contenant une solution étendue d'acide chlorhydrique (1 000 centimètres cubes d'eau pour 125 centimètres cubes d'acide chlorhydrique du commerce). La catode de platine est assez éloignée des lames d'argent qui sont placées côte à côte; de cette manière l'action est uniforme et la même sur les deux lames.

Quand le courant passe, la lame noircit puis prend successivement les couleurs ordinaires des lames minces; on attend que le violet reparaisse pour la quatrième fois; on sort les lames et on les lave à grande eau. Pour juger de l'intensité absolue du courant de chloruration, on interpose un voltamètre à gaz.

On sèche les lames, on les vernit au dos : elles sont prêtes à servir. On peut, avant de les vernir, les recuire entre 150 et 200° jusqu'à ce qu'elles deviennent rosâtres.

Les lames vernies sont plongées dans la cuve à faces parallèles remplie d'une solution à 2 p. 100 d'acide sulfurique. Il est difficile de ne pas avoir de courant même dans l'obscurité, les lames n'étant jamais modifiées exactement de la même manière; mais le courant diminue peu à peu et finit par s'annuler.

Quand alors on éclaire une des lames, elle devient le pôle négatif de la pile.

3° — Actinomètre en cuivre oxydé.

Les lames de cuivre électrolytique sont bien décapées et polies au papier d'émeri. On les place sur une plaque de cuivre assez épaisse, chauffée en dessous par un bec Bunsen. On examine sous une incidence de 45°; on constate l'apparition des couleurs des lames minces. On va jusqu'au troisième violet; la force électromotrice varie en effet notablement avec l'épaisseur d'oxyde. Pour des épaisseurs voisines de celle indiquée, elle est maxima et de l'ordre du millième de volt.

Comme électrolyte dans l'actinomètre, on utilise des solutions aqueuses à 5 p. 100 de sulfate, de chlorure ou d'iodure de potassium ou de sodium. La force électromotrice pour un éclairage donné dépend du sel et de sa concentration.

4° — Résultats généraux.

L'expérience montre que, pour un éclairage monochromatique, il n'y a pas proportionnalité entre la force électromotrice e et l'éclairement E. L'actinomètre ne peut donc pas servir de photomètre.

A la vérité la proportionnalité existe grossièrement pour les faibles éclairements; mais la force électromotrice croît certainement moins vite que l'éclairement, dès que celui-ci est grand. Enoncer la proportionnalité entre e et E pour E petit, revient donc simplement à dire que la tangente à la courbe $e = f(E)$ n'est ni verticale, ni horizontale : ce qui est assez maigre comme indication.

Plaçons successivement l'actinomètre aux divers points d'un spectre pur *normal* (ou ramené par le calcul à être normal, § 122). Eclairons la fente avec la lumière blanche, de manière que les intensités *relatives* des diverses radiations soient bien déterminées. Nous obtenons une courbe assez irrégulière qui présente un maximum pour une certaine longueur d'onde.

Cette courbe varie avec l'épaisseur de la couche sensible, avec la

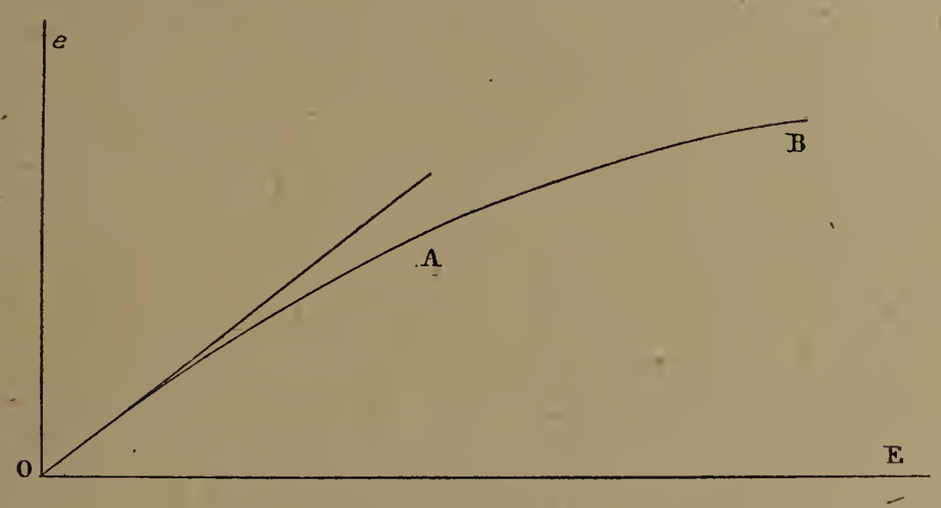


Fig. 243.

nature et la concentration de l'électrolyte ; seule la position du maximum semble indépendante de l'électrolyte.

Avant de les placer dans l'actinomètre, plongeons les lames dans une matière colorante (éosine, érythrosine,...) ; la courbe est complètement modifiée. Ses ordonnées sont grandies : la force électromotrice maxima dépasse parfois le centième de volt. Le maximum de force électromotrice avec la matière colorante correspond à une radiation de longueur d'onde plus grande que celle qui correspond au maximum d'absorption par cette matière. Comme pour l'orthochromatisme, la loi simpliste qui veut l'égalité, ne se vérifie pas (§ 277).

On a trouvé qu'un actinomètre à sulfure d'argent (voir § 332) est sensible aux radiations infra-rouges dont la longueur d'onde est de l'ordre de $1^{\mu},3$. La lame « éclairée » est le pôle négatif de la pile formée. A la vérité si l'on chauffe une des lames, on crée une pile ; mais l'instantanéité et la grandeur du phénomène dans le cas qui nous occupe, ne permettent pas de l'attribuer à un échauffement.

331. Actinomètre en argent ioduré. Non uniformité des actions lumineuses.

1° — L'actinomètre en *argent ioduré* nous apprendre des choses intéressantes.

On part de deux lames d'argent bien polies. On les iodure dans l'obscurité en les exposant aux vapeurs d'iode jusqu'à ce que la couche soit jaunâtre : pour s'en rendre compte, on éclaire avec une bougie

placée loin. On les plonge dans la cuve de l'actinomètre remplie d'eau très faiblement acidulée (quelques gouttes d'acide nitrique ou sulfurique). On les laisse quelque temps en court-circuit de manière que la force électromotrice de l'élément devienne quasi nulle à l'obscurité; on introduit alors dans le circuit la grande résistance et le galvanomètre sensible.

Les lames sont choisies étroites, de l'ordre de 5 millimètres.

On réalise un spectre pur, de 30 centimètres de longueur, pour fixer les idées.

On promène l'actinomètre dans ce spectre en ne laissant jamais la lame éclairée découverte que peu de temps.

On mesure la force électromotrice par l'arc de première impulsion.

2° — On place l'actinomètre du côté de l'infra-rouge. L'expérience montre qu'en le déplaçant vers les violets, on n'obtient de déviation sensible qu'au niveau de la raie F, dans le bleu par conséquent.

Le maximum est atteint entre G et H.

Revenons en sens contraire : nous constatons que la lame qui a subi l'action des radiations très réfrangibles, est devenue sensible jusqu'au rouge; de sorte que la nouvelle déviation est maxima entre D et E.

D'où la conclusion générale : *la sensibilité pour une radiation d'une certaine longueur d'onde dépend de l'état actuel de la lame, état qui est une fonction de toutes les actions antérieures.*

Les expériences manquent pour énoncer quoi que ce soit de plus précis. En particulier on voudrait savoir si l'action d'une radiation pendant un temps donné avec une intensité donnée, peut être remplacée par l'action d'une autre radiation agissant pendant un certains temps avec une certaine intensité. Becquerel a l'air d'admettre une action spécifique de chaque radiation; cela revient à dire que l'état de la plaque d'argent est une fonction d'une infinité de variables, tandis que rien dans ses expériences n'empêcherait qu'elle ne fût fonction que d'une variable. Pour que les radiations peu réfrangibles agissent, il suffirait que la valeur de cette variable fût assez grande.

332. **Transmetteur téléphonique photochimique.**

Par électrolyse d'une solution aqueuse étendue de sulfure de sodium du commerce recouvrons une lame d'argent A d'une mince couche de sulfure d'argent. Une autre lame d'argent B est simplement décapée. Plongeons les lames dans un tube T rempli d'eau acidulée par quelques gouttes d'acide sulfurique. Nous formons un couple qui possède une force électromotrice très faible; il se polarise du reste rapidement.

Exposons la face sulfurée à un faisceau lumineux intermittent issu de la source S placée derrière un disque tournant percé de trous. Nous entendons un son dans le téléphone mis en circuit avec l'actinomètre.

La hauteur du son peut dépasser 1 000, preuve de la rapidité avec laquelle varie la force électromotrice.

Il est cependant illégitime de conclure que la force électromotrice est une fonction bien déterminée de l'éclairement actuel, autrement dit, que les effets sont instantanés. Tout ce qu'on peut conclure est qu'ils sont susceptibles de variations rapides : ce qui n'est pas du tout la même chose.

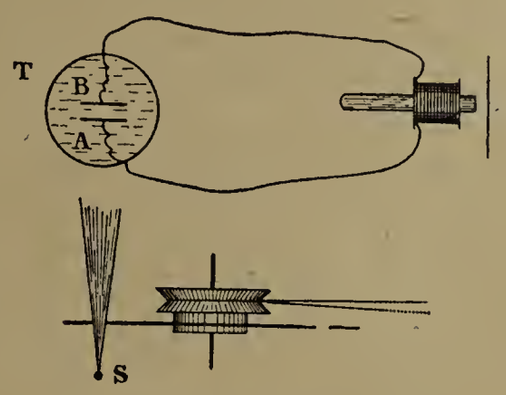


Fig. 244.

L'expérience du sélénium est bien faite pour nous rendre prudents. Il se peut que pendant un millième de seconde l'oscillation de la force électromotrice ne soit que d'une très petite fraction de sa valeur moyenne. Tout nous met en garde contre ce que disent certains auteurs, sur l'obéissance instantanée des actinomètres à un signal lumineux.

L'actinomètre à cuivre oxydé (§ 330) donne des résultats analogues.

Images de Niepce de Saint-Victor et de Moser.

Je réunis dans les paragraphes suivants des expériences curieuses qui ont été d'abord interprétées comme prouvant l'existence de radiations invisibles particulières, mais qui s'expliquent aisément sans cette hypothèse. Ces phénomènes conduisent à admettre que, *par suite d'une insolation préalable ou pour une autre cause, certains corps émettent des vapeurs (non des radiations) capables d'agir sur les couches sensibles.* Quand la lumière intervient, c'est donc indirectement, comme créant des corps volatils qui produisent sur les couches sensibles des effets identiques ou analogues à ceux dont elle est cause.

Il n'y a pas emmagasinement de lumière, comme le voulait Niepce de Saint-Victor, mais emmagasinement de corps produits par la lumière, ce qui est tout différent.

L'étude de ces phénomènes montre à quel degré les surfaces des corps sont facilement modifiables, à quel point les matières dont le grain nous paraît le plus serré, sont capables d'absorber.

C'est du reste ce qui résulte déjà avec évidence du chapitre précédent.

333. Expériences de Niepce de Saint-Victor.

1° — On expose aux rayons solaires pendant un quart d'heure une gravure d'abord tenue plusieurs jours dans l'obscurité. Pendant l'insolation une moitié est couverte d'un écran opaque ; elle servira de témoin. On applique cette gravure sur une couche sensible, au gélatinobromure par exemple. On maintient le contact au moyen de poids pendant quelques heures. On développe : *contre la partie insolée, la couche*

donne en noir les blancs de papier. La partie rendue active par insolation est donc le papier : l'encre d'imprimerie sert de *réserve.*

Si l'on interpose une lame de verre, de mica, de cristal de roche, entre la gravure et le papier, les blancs du papier n'impressionnent plus la couche sensible.

Une gravure insolée placée à une petite distance de la couche (1 à 3 millimètres) se reproduit très bien.

Un dessin à gros traits se reproduit à 1 centimètre de la couche.

On admet que la lumière donne avec le papier un corps tel que l'acide formique (HCOOH) qui est volatil et réducteur : volatil, il peut agir sans contact immédiat; réducteur, il produit sur la couche sensible un effet analogue à la lumière, c'est-à-dire un commencement de réduction. L'interposition d'une lame de verre l'empêche évidemment d'agir.

Dans ce qui précède, nous supposons que la couche sensible est *à image latente et à développement*; l'expérience réussit avec des papiers à noircissement direct (papier au chlorure d'argent, c'est-à-dire salé et sensibilisé à l'azotate d'argent).

2° — L'agent créé sur le papier par la lumière peut se transmettre à un autre papier.

On expose la gravure une heure en plein soleil; on l'applique sur un carton blanc antérieurement maintenu plusieurs jours dans l'obscurité; on laisse au contact pendant vingt-quatre heures. On met le carton au contact d'une couche sensible pendant quelques heures; les blancs de la gravure viennent en noir par noircissement direct ou après développement.

3° — Du papier blanc, d'abord maintenu plusieurs jours dans l'obscurité, est insolé, sous un négatif par exemple, en plein soleil et pendant une heure pour que l'action soit suffisante.

On enlève le cliché et on traite par l'azotate d'argent : on voit apparaître un positif qu'on fixe par simple lavage. Aussi le papier blanc insolé est devenu capable de réduire l'azotate d'argent. Même action sur le chlorure d'or; pour augmenter la sensibilité du papier, on peut l'enduire préalablement d'une solution d'acide tartrique et le faire sécher.

4° — Une feuille de papier, *encollée à l'amidon*, est exposée à la lumière, puis traitée dans l'obscurité par l'iodure de potassium ; la couleur bleue caractéristique de l'iodure d'amidon apparaît. Preuve que de l'iode a été mis en liberté par décomposition de l'iodure.

La réaction est très sensible.

5° — Si le papier blanc qu'on insole est enduit d'une solution fluorescente de sulfate de quinine, l'action est beaucoup plus intense.

6° — Les radiations de diverses longueurs d'onde n'agissent pas également; ce sont les bleus et les violets dont l'action est prédominante.

334. Expériences avec un tube de fer-blanc.

1° — On tapisse de papier blanc un cylindre de fer-blanc fermé à un bout. On l'expose pendant une heure, le bout ouvert en avant, aux rayons solaires directs.

Dans l'obscurité, on pose ce bout sur du papier à noircissement direct : après vingt-quatre heures, on constate qu'il est dessiné en noir sur fond blanc.

2° — On ferme le tube aussitôt l'exposition terminée. Il conserve pendant longtemps la faculté d'agir sur la couche sensible quand on la débouche et qu'on la pose sur elle. La fermeture hermétique empêche le corps actif de s'évaporer.

3° — Recommençons l'expérience en utilisant du papier humecté d'une solution d'acide tartrique, puis séché. Insolons, projetons quelques gouttes d'eau sur le papier, fermons le tube et chauffons vers 50°.

Dans l'obscurité, ouvrons le tube et posons-le sur la couche sensible. L'action est alors très rapide. L'explication est évidente : la vapeur d'eau et l'élévation de la température facilitent l'évaporation du corps actif.

4° — Le tube contenant du papier insolé est laissé quatre heures dans un endroit chaud. On le débouche en tenant l'ouverture en bas ; avec précaution on retire le papier. Dans l'obscurité, on pose le tube sur une couche sensible. Malgré l'absence du papier insolé, l'action se produit ; preuve qu'elle est due à l'air qui est resté chargé du corps volatil actif.

5° — L'abbé Laborde a montré que le corps produit est de l'acide formique.

Le papier bleu de tournesol exposé à l'action du papier insolé rougit. Si on le recouvre à moitié d'une lame de verre, ne rougit que la partie découverte, par suite non protégée.

Le papier insolé perd rapidement ses propriétés si on place près de lui en vase clos un papier buvard humecté d'une solution de potasse.

Une capsule pleine d'eau est exposée à l'action du papier. Additionnée de nitrate d'argent, le liquide noircit promptement à l'ébullition ; il y a réduction de nitrate.

Au reste la boîte insolée a bien l'odeur d'acide formique.

6° — L'acide formique HCOOH provient d'une oxydation par la lumière.

Thénard a montré que le papier traité par l'oxygène ozonisé, donne exactement les mêmes effets que le papier insolé. Conservé pendant quelque temps dans un tube à essai, il dégage l'odeur d'acide formique.

On met dans un verre à expérience de l'acide tartrique en solution concentrée ($COOH-CH^2OH-CH^2OH-COOH$) et un oxydant (litharge ou oxyde de manganèse) ; il se dégage de l'acide formique qui produit dans l'obscurité sur du papier sensible le même effet que le papier insolé.

Il est curieux que l'effet de la lumière puisse ainsi se manifester par des effets contraires : une réduction, une oxydation.

335. **Expériences de Niepce sur la porcelaine.**

Niepce expose au soleil pendant deux ou trois heures une partie fraîchement cassée de la tranche d'une assiette de porcelaine. Il l'applique dans l'obscurité sur du papier sensible et obtient un noircissement après vingt-quatre heures. Les porcelaines tendres sont les plus actives.

La moitié d'une plaque d'acier poli est dépolie par une solution d'acide nitrique; on la nettoie tout entière à l'alcool et on insole trois ou quatre heures. On applique dans l'obscurité sur du papier sensible; il noircit au contact de la partie *dépolie* insolée.

Une lame de verre, fortement dépolie et parfaitement nettoyée à l'eau distillée donne les mêmes résultats.

Une tablette de marbre noir, parsemée de taches blanches, est exposée à la lumière et appliquée sur le papier sensible; les parties blanches sont seules actives. Une tablette de craie insolée est active, une tablette de charbon ne l'est pas.

Pour expliquer ces expériences il est bien difficile d'invoquer une action chimique.

336. **Expériences de Waidelé.**

Niepce expliquant ses expériences par une nouvelle espèce de lumière invisible, suivait les traces de Moser; ces physiciens ne furent du reste pas les derniers à inventer de nouvelles radiations : tout le monde connaît les découvertes sensationnelles de MM. Le Bon et Blondlot. N'empêche que les expériences de Moser, de Waidelé, de Fizeau, sont en elles-mêmes fort intéressantes comme nous forçant à réfléchir sur le peu qu'il faut pour modifier les propriétés superficielles des corps et sur la porosité des corps dont le grain nous paraît le plus serré.

1° — Le lecteur répétera l'expérience très remarquable suivante. Sur une glace bien nettoyée et séchée, appliquons un morceau de papier. Soufflons l'haleine à la fois sur le papier et la glace; retirons le papier : ses bords apparaissent nettement dessinés par la buée. Attendons que l'haleine soit évaporée, que la trace du papier ait disparu.

Soufflons de nouveau : elle reparaît. Attendons que la buée soit évaporée; soufflons : elle reparaît encore..., et ainsi de suite. Nous pouvons recommencer bien des fois avec le même résultat, même en séparant les insufflations successives par des temps de l'ordre de l'heure.

Donc sous une forme ou sous une autre, les traitements différents subis au début de l'expérience par les parties voisines de la glace, influent sur toutes les opérations ultérieures, naturellement avec une intensité qui diminue peu à peu.

2° — Waidelé opère sur des plaques d'argent ou de plaqué d'argent qu'il

polit avec du tripoli. Cette poudre absorbant l'humidité de l'atmosphère, il faut la sécher : ce qu'on réalise au mieux par une légère calcination.

La plaque polie avec la poudre récemment calcinée montre, après insufflation, une belle coloration bleue; polie avec la poudre calcinée et abandonnée quelques jours à l'air, elle montre une coloration brunâtre.

La plaque qui montre la coloration bleue donne la coloration brune si on l'abandonne quelque temps à l'air.

3° — Pour montrer que la différence des effets du tripoli tient à ce que ses grains absorbent les gaz avec avidité et en sont privés par la calcination, Waidelé répète l'expérience avec le charbon dont les propriétés absorbantes sont bien connues.

Il calcine du charbon en poudre, le refroidit sur une plaque de fer et le sature d'anhydride carbonique sec. Il calcine une nouvelle quantité de charbon. Aussitôt qu'il est refroidi, il verse côte à côte les deux poudres sur une plaque d'argent polie. Après deux minutes, il les balaie et insuffle l'haleine. Les régions de la plaque que recouvrait le charbon récemment calciné, par conséquent avide de gaz, apparaissent en bleu; celles que recouvrait le charbon saturé d'anhydride carbonique, par conséquent prêt à en céder, apparaissent en brun.

Ainsi le polissage par l'émeri calciné ou le contact du charbon calciné permettent d'obtenir une surface privée de gaz; ces poudres les absorbent énergiquement et vident l'argent qui est au contact. Au contraire, le polissage par l'émeri assez longtemps abandonné à l'air ou le contact du charbon gavé de gaz, en saturent la plaque d'argent.

4° — Par le procédé qu'on vient de décrire, on sature la plaque d'argent de gaz carbonique ou d'ammoniac; on insuffle l'haleine : la coloration est brune. On pose sur la plaque une rondelle de charbon de bois, calcinée dans un creuset fermé de platine et refroidie. Après quelques minutes on retire la rondelle, on insuffle : sa trace paraît bleue sur fond brun.

De même on sature la plaque d'hydrogène; on dessine avec un morceau d'éponge de platine; on insuffle : les traits viennent en bleu sur fond brun.

337. **Expériences de Moser.**

1° — Un grand nombre d'expériences rentrent dans la formule suivante : *La lumière agit sur toutes les substances; on met son action en évidence à l'aide d'une vapeur quelconque qui adhère à la substance ou exerce sur elle une action chimique.*

Les expériences précédentes donnent la clef du phénomène. Il n'est pas nécessaire d'invoquer une action chimique de la lumière; pour rendre compte des résultats obtenus, il suffit d'admettre que les parties insolées sont, par exemple, un peu plus chaudes que les voisines non insolées; les gaz que renferme la surface sont, par suite, inégalement répartis.

Nous venons de voir qu'il en résulte des condensations inégales pour les vapeurs qu'on fait agir.

2° — Voici les expériences fondamentales.

Une plaque d'argent est nettoyée et polie avec soin. On la recouvre (sans qu'il y ait contact, pour éviter à coup sûr toute action directe) d'un écran noir percé de trous. On expose aux rayons solaires.

La plaque refroidie ne montre rien. On la soumet aux vapeurs que fournit le mercure chauffé à 75° (§ 326) : *il se forme une image distincte.*

Le mercure se précipite davantage sur les régions insolées.

On recommence l'expérience avec une glace qu'on expose aux rayons solaires sous l'écran : l'insufflation de l'haleine donne une image distincte.

On recommence avec une plaque de cuivre : le développement de l'image se fait à la vapeur d'iode.

338. **Autres expériences de Moser.**

1° — Un grand nombre d'expériences rentrent dans le principe suivant : *Deux corps quelconques mis en présence et suffisamment rapprochés impriment l'un sur l'autre leurs images.*

Il n'est évidemment pas possible d'invoquer la lumière (du moins celle que nous connaissons), puisque les expériences se font à l'abri de toute lumière, dans une chambre noire ou dans une boîte close.

Voici d'abord deux faits connus depuis longtemps.

Quand on ouvre le fond d'une montre, on est encore séparé des rouages par un second fond qu'on appelle *cuvette*; les faces en regard des deux fonds sont à une distance de quelques dixièmes de millimètres. Or, on voit souvent reproduites sur le fond les indications gravées sur la cuvette.

Parfois l'image d'une gravure se forme sur la glace qui la recouvre *sans la toucher*. On obtient la même image sur le cuivre, le laiton et l'or. Au contact les images se forment très vite; elles ne résistent pas au frottement.

Ici l'image est visible; le plus souvent il faut le déceler au moyen d'une vapeur (vapeur d'eau ou de mercure).

Sur une plaque d'argent, iodée comme pour obtenir l'image daguerrienne, on place *dans l'obscurité* une plaque d'agate taillée en creux, une plaque de métal gravé, une bague d'écaille,... On expose aux vapeurs de mercure : on voit apparaître une image distincte des figures de l'agate, des caractères de la plaque,...

2° — L'explication proposée par Fizeau repose sur l'existence de la plupart des corps de matières grasses *volatiles*, dont la quantité varie avec la configuration des reliefs et des creux. Elles s'évaporent et se condensent sur les corps voisins en fournissant une image.

Voici les preuves en faveur de cette théorie.

a) Un corps ne donne pas successivement un nombre indéfini d'images.

Son pouvoir s'affaiblit peu à peu, surtout s'il est compact comme les métaux; on l'annule en chauffant le corps à une température assez élevée.

b) Lorsque le corps a perdu son pouvoir de reproduction, on le lui rend en passant les doigts à la surface, ou en le frottant avec les poils d'un animal vivant, poils toujours enduits de suint.

c) En élevant la température du corps à reproduire, on diminue le temps nécessaire à la formation de l'image, en rendant plus volatils les corps qui le recouvrent.

d) Une surface polie, qui a reçu à distance l'image d'un corps, est capable de la passer à une autre surface polie placée au voisinage.

On obtient ainsi une image secondaire, tertiaire,...

e) On annule l'action par interposition d'un mica même très mince.

3° — Loin de lui être contradictoire, l'explication de Waidelé complète celle de Fizeau.

Sur une plaque d'argent polie, on place pendant quelques minutes un poinçon d'acier gravé; on l'enlève, on expose la plaque à la vapeur de mercure. Elle se condense plus fortement sur les endroits touchés par le poinçon, endroits qui correspondent à ses reliefs.

On recommence l'expérience après avoir laissé pendant longtemps le poinçon dans de la poudre de charbon saturée de CO^2. La vapeur se condense sur les parties non touchées par le poinçon, parties qui se trouvaient sous ses creux.

Des expériences analogues conduisent aux résultats généraux suivants.

La plaque ou le poinçon peuvent être saturés ou privés de gaz. S'ils se trouvent dans des états opposés, l'image vient rapidement; elle est très visible. S'ils se trouvent dans le même état, leur influence mutuelle est quasi nulle. La vapeur s'attache aux parties de la plaque qui sont sous les creux ou sous les reliefs du poinçon, suivant que la plaque est d'abord privée ou saturée de gaz. Naturellement on a tous les états intermédiaires suivant l'intensité des préparations relatives de la plaque et du poinçon.

Voici une dernière expérience.

Un poinçon est saturé de gaz carbonique par son séjour dans la poudre de charbon. On le pose successivement pendant une demi-heure sur six plaques d'argent polies et préparées de même. Les trois premières exposées à la vapeur du mercure montrent son image, mais avec une intensité décroissante; la quatrième fournit une vague silhouette par insufflation, les deux autres ne donnent rien.

4° — Moser avait prétendu que l'action daguerrienne ne relevait pas de la chimie, étant absolument générale et provenant seulement de la modification des propriétés physiques de la surface.

Waidelé fait l'expérience suivante.

Sur une plaque d'argent iodurée on pose dans l'obscurité une pièce de monnaie. Après quelque temps, l'image peut être *développée* à la

vapeur d'eau, d'iode ou de mercure. Il y a modification physique de la surface.

Une autre plaque d'argent iodurée est exposée dans la chambre noire. L'image n'apparaît que sous l'influence de la vapeur de mercure. *Il peut y avoir modification physique de la surface*, mais elle est trop faible pour se déceler à la vapeur d'eau; seule la modification donnant lieu à une réaction chimique est décelable.

Enfin exposons une plaque iodurée à la lumière, retournons dans la chambre noire; avant de développer à la vapeur de mercure, plaçons dessus une pièce de monnaie pendant un temps suffisant. Nous pouvons créer deux tendances inverses pour la vapeur de mercure, et *en un sens* annuler l'effet de la lumière.

CHAPITRE VI

PHOTOGRAPHIE DES COULEURS

339. Procédé Ducos du Hauron par soustraction.

1° — Le procédé consiste essentiellement à superposer trois épreuves *monochromes* (rouge, jaune, bleue) obtenues à travers trois verres de couleurs convenables. Pour fixer les idées du lecteur et débrouiller une question complexe, qu'on se représente trois images de traits identiques, obtenues sur un substratum transparent mince (tel que la gélatine ou le celluloïd), coloriées respectivement en rouge, jaune et bleu, enfin superposées. On demande à quelle condition un tel système est capable de reproduire les couleurs d'un objet, quand il est vu par transparence, c'est-à-dire quand chaque couche colorée agit *par soustraction* (§ 216).

Les épreuves monochromes qu'utilise Ducos de Hauron sont des photographies au charbon.

Il est difficile de comprendre, non certes que le procédé Ducos du Hauron soit absolument incapable de reproduire *exactement* les couleurs, mais qu'il puisse donner quelque chose ayant avec les couleurs du modèle une vague ressemblance.

Pour y parvenir énonçons d'abord quelques propositions.

a) La couche de gélatine d'une épreuve *au charbon* est *plus épaisse* dans les parties qui correspondent aux blancs du négatif qui la donne par contact, par suite *aux noirs* du modèle. Il faut se rappeler que l'épreuve est censément faite *en noir*, *au charbon*; si l'on emploie de la sanguine, par exemple, à la place du charbon, les rouges intenses représentent censément les noirs de l'objet.

b) Quand on regarde un fond blanc à travers une couche rouge, il ne faut pas dire qu'on reçoit du rouge; il faut dire qu'on reçoit du blanc plus ou moins privé des radiations qui ne sont pas rouges.

La suite montre que c'est bien là le seul énoncé correct; la coloration est obtenue *par soustraction*.

Quand on regarde un fond blanc à travers la superposition d'une couche rouge et d'une couche verte, on est bien obligé de dire, conformément à l'énoncé précédent, qu'on reçoit du blanc plus ou moins

privé par la couche rouge des radiations qui ne sont pas rouges, plus ou moins privé par la couche verte des radiations qui ne sont pas vertes : en définitive le blanc est plus ou moins dépouillé de vert et de violet par la couche rouge, de rouge et de violet par la couche verte. Dans la lumière transmise il y a des chances pour que le bleu et le violet soient absents. Quant à la teinte résultante, nous pouvons dire seulement que, suivant l'épaisseur des couches, elle ira par la série des teintes intermédiaires du rouge lavé au vert lavé.

Quand on regarde un fond blanc à travers la superposition de trois couches rouge, jaune, bleue, ou rouge, verte, bleue, on reçoit du blanc plus ou moins privé de ce qui n'est pas rouge, de ce qui n'est pas jaune, de ce qui n'est pas bleu. Suivant les épaisseurs relatives des couches, on aura toutes les couleurs plus ou moins lavées, sans qu'il soit humainement possible de prévoir ce qu'on obtiendra.

2° — Pour fixer les idées et simplifier la discusion, supposons que les couleurs de l'objet soient réduites à trois : le rouge, le vert, le bleu, juxtaposées d'une manière quelconque. Supposons d'autre part que nos couches soient parfaitement transparentes pour les couleurs correspondantes et suivant leurs épaisseurs plus ou moins opaques pour les autres.

Pour commencer posons que l'objet est rouge ; cherchons à quelle condition on le verra rouge dans la superposition des trois couches images rouge, verte et bleue. Il est bien évident que les couches verte et bleue doivent avoir une épaisseur faible, et que la couche rouge doit avoir une épaisseur suffisante, sans quoi le rouge serait trop lavé de blanc. Si l'objet est formé de trois parties R, V, B, qui sont respectivement rouge, verte et bleue, les trois couches ne doivent avoir d'épaisseur sensible : la première que dans les parties qui sont les images de la portion R de l'objet, la seconde dans les parties qui sont images de V, la troisième dans les parties qui sont image de B.

3° — Ceci posé, opérons par la méthode ordinaire au charbon, en colorant la gélatine de manière à réaliser successivement nos trois couches. Nous savons que les grandes épaisseurs d'une couche correspondent aux parties sombres de l'objet. D'autre part la couche rouge doit avoir sa grande épaisseur là où l'objet est rouge. Pour obtenir cette couche, nous devons donc photographier l'objet en l'éclairant avec de la lumière à la fois verte et bleue qui ne laissera sombres que les parties rouges. Autrement dit, pour obtenir la couche rouge, nous devons éclairer l'objet avec de la lumière complémentaire du rouge qui colore la couche.

Nous supposons le cas extrême : objet formé de trois parties respectivement rouge, verte et bleu. Nous avons alors trois couches colorées dont l'épaisseur est nulle sauf aux parties de même couleur sur l'objet. Nous admettons la possibilité des demi-teintes monochromes.

Généralisons : voici le principe de la méthode Ducos du Hauron.

On obtient trois négatifs en éclairant l'objet avec trois couleurs com-

plexes que nous appellerons α, β, γ. On réalise trois positifs avec de la gélatine colorée par les couleurs complémentaires *a*, *b*, *c*. On superpose les trois positifs. On a *par transparence* une épreuve colorée *où il n'est pas impossible de reconnaître les couleurs de l'objet.*

Voici ce que nous apprend la théorie; elle prouve amplement l'impossibilité pratique d'obtenir quoi que ce soit de conforme à l'objet.

Nous allons voir que la technique rend le résultat encore plus incertain.

Remarquons en passant qu'aux noirs francs de l'objet doivent correspondre sur les trois couches des épaisseurs notables; par leur superposition, elles suppriment la lumière blanche.

340. Technique de la méthode Ducos du Hauron.

1° — Une des principales difficultés d'application de la méthode est aujourd'hui supprimée par l'existence de plaques sensibles pour tout le spectre (plaques panchromatiques). Elles sont, il est vrai, fort inégalement sensibles pour le bleu et le rouge : mais on peut, théoriquement au moins, compenser ces différences par des temps de pose convenables. Admettons donc qu'il soit possible de photographier sur plaque au gélatinobromure un objet de couleur quelconque.

Nous savons qu'il faut obtenir trois épreuves avec trois lumières α, β, γ, que nous nous garderons d'appeler *monochromes* parce qu'elles ne le sont pas et ne peuvent l'être. Deux méthodes possibles : on photographie à travers trois écrans placés derrière l'objectif; on éclaire avec de la lumière électrique tamisée par ces trois écrans. La seconde méthode n'implique pas dans les écrans l'existence de qualités optiques telles que l'homogénéité ou la planéité.

Mais nous savons que pour obtenir quelque chose qui se rapproche vaguement de la réalité, il faut que les couleurs α, β, γ, transmises par les écrans et les couleurs *a*, *b*, *c*, transmises par les couches de gélatine colorées, soient complémentaires.

Il est impossible de réaliser cette condition.

On prend pour couleurs *a*, *b*, *c*, de la gélatine *la laque de garance*, *le jaune de chrome* et *le bleu de Prusse.*

Ils existent dans le commerce sous forme de couleurs à l'aquarelle, en tablettes qu'il suffit de délayer dans la gélatine.

On prend alors au petit bonheur trois écrans α, β, γ, non pas exactement complémentaires de *a*, *b*, *c*, mais respectivement opaques pour *a*, *b*, *c*; ce qui est fort loin d'être la même chose. Opaque pour les radiations transmises par *a*, *b*, *c*, et parfaitement transparents pour toutes les autres radiations, ils seraient complémentaires.

On ne leur en demande pas tant.

Pour écran α on prend un vert; pour écran β, un violet; pour écran γ, un orangé; le mieux est d'acheter les écrans tout préparés. On tire les trois négatifs avec la lumière blanche tamisée par ces écrans; on fait

trois épreuves au charbon en prenant pour support de la gélatine une couche mince de celluloïd; il ne reste plus qu'à superposer les épreuves.

2° — Espérer obtenir autre chose que des couleurs rappelant vaguement celles de l'original est illusoire, si, outre les difficultés théoriques inhérentes aux procédés de coloration *par soustraction*, on remarque qu'il y a trois positifs et trois négatifs à tirer dont les valeurs relatives influent sur le résultat.

On obtiendra donc n'importe quoi; on n'obtiendra jamais la même chose.

Ce procédé et des procédés analogues sont utilisables parce que l'œil est extraordinairement facile à contenter. Pourvu qu'on lui montre de la couleur, il s'inquiète peu de savoir quel degré de concordance existe entre le modèle et l'original. C'est chatoyant, c'est amusant : que veut-on de plus? Les roses sont violettes, les citrons sont orangés, les oranges couleur de citron : nous en sommes quittes pour croire que les oranges n'étaient pas mûres, que les citrons sont d'une espèce jusqu'à ce jour inconnue, et que les roses méritent pour leurs couleurs un grand prix à l'exposition. Mais reproduisez un tableau dont l'original soit facilement accessible; on s'apercevra de l'inexactitude du procédé!

341. Impression trichrome.

Nous étudierons plus loin (§ 416) sous le nom de *lithographie sur gélatine* ou de *photocollographie*, un procédé qui permet d'obtenir par impression lithographique la reproduction d'un dessin. On recouvre une dalle de verre d'une couche de gélatine bichromatée, on expose sous un négatif. Sous les *blancs* de ce négatif, c'est-à-dire dans les parties qui correspondent aux *noirs* de l'objet, la gélatine perd la propriété de s'imbiber d'eau, par suite acquiert celle de fixer l'encre grasse *après passage d'une éponge mouillée*.

Mais ici ce sont non plus les parties de la gélatine qui correspondent aux *noirs* de l'objet, que nous voulons rendre capables de fixer l'encre coloré, mais les parties qui correspondent aux *lumières* de l'objet. D'où la nécessité de procéder comme au § 340, de réaliser les trois négatifs en éclairant l'objet avec les complémentaires des couleurs contenues par les encres d'impression (laque de garance, jaune de chrome et bleu de Prusse).

Nous savons (§§ 216 et 469) que la coloration est encore ici *par soustraction*, les trois couches colorées étant à peu près transparentes et la réflexion s'opérant sur les couches profondes.

La question se pose de savoir si vraiment il est avantageux de demander à la photographie de jouer le rôle du chromiste. La pratique montre qu'il est plus simple de n'exiger d'elle que le dessin. De ce dessin on supprime par des caches les parties inutiles pour réaliser les reports qui correspondent aux diverses couleurs d'une chromolitho-

graphie. Nous reviendrons là-dessus au § 402. On peut soutenir sans paradoxe que le principal avantage de la photographie en couleur est de fournir des résultats *imprévus*, qui *par conséquent* ne manquent pas de charme.

342. Procédé Cros et Ducos du Hauron par addition.

1° — Le procédé suivant, peu pratique mais théoriquement bien préférable au précédent, conduit naturellement aux procédés actuels.

Obtenons trois diapositifs ordinaires A, B, C, en éclairant l'objet avec

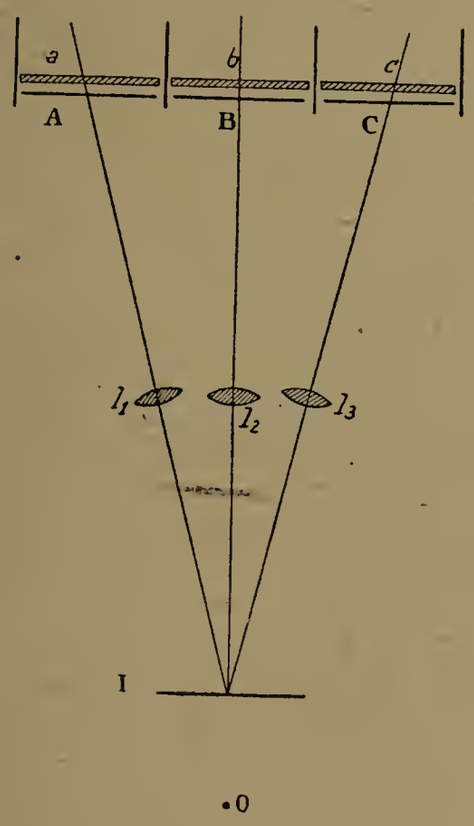


Fig. 245.

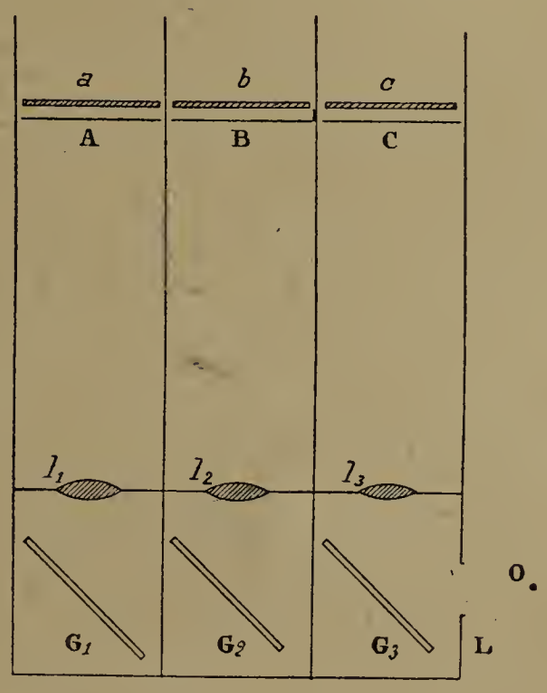


Fig. 246.

de la lumière transmise par des écrans colorés *a*, *b*, *c*. Dans chaque épreuve, les « lumières » correspondent aux parties transparentes des clichés. Par un procédé optique quelconque (fig. 245) superposons les images des clichés, en les éclairant avec de la lumière tamisée par les mêmes écrans *a*, *b*, *c*. Nous obtenons une image colorée reproduisant d'une manière assez fidèle les couleurs de l'objet.

La figure 246 montre un procédé correct de superposition. Les clichés sont dans les plans focaux principaux de trois lentilles identiques. L'œil est en O. Il regarde par réflexion sur trois glaces sans tain, et par transmission à travers une ou deux de ces glaces pour les clichés B et A. Si l'œil est myope, on intercale une lentille convergente en L.

On peut aussi bien opérer par projection au moyen de trois lentilles.

Voici une méthode simple de reconstitution, mais qui exige une chambre photographique spéciale à trois objectifs. On obtient simultanément trois négatifs avec les objectifs recouverts d'écrans colorés; on

tire trois positifs par contact ou directement en inversant les négatifs; on les replace dans l'appareil; on les éclaire par derrière : on projette ainsi, au moyen des objectifs et à travers les écrans, une triple image qui reproduit l'objet avec ses couleurs. Le repérage des clichés est facile puisqu'il suffit de les remettre dans la position qu'ils avaient lors de l'obtention des négatifs.

2° — Dans la méthode précédente est en germe la méthode actuelle. Dès 1869 Ducos du Hauron entrevoyait la possibilité de n'employer qu'une couche sensible : de cette couche il attribuait certaines régions à chacune des couleurs, les régions étant assez petites et assez régulièrement distribuées pour que les lumières transmises en un point quelconque formassent du blanc dans l'œil situé à une distance suffisante. Il recouvrait le substratum de la couche sensible de raies alternativement rouges, vertes et bleues, très minces, parallèles, visibles à la loupe, mais se fusionnant à distance dans une sensation blanche.

Étendons sur le réseau coloré une couche sensible. Photographions en tournant le réseau vers la lumière. Développons et fixons. Nous obtenons par transparence une image colorée complémentaire de l'objet; il ne reste qu'à obtenir une inversion de cette image.

C'est la méthode actuelle.

343. **Photographie des couleurs; procédé de Joly.**

Je décris d'abord un procédé qui n'est plus employé, mais qui a l'avantage de préparer le lecteur au procédé actuel.

Réalisons un écran formé de lignes transparentes *rouges*, *vertes*, *violettes*, juxtaposées et régulièrement alternées; il y a environ 70 lignes au centimètre.

Photographions à travers ce réseau appliqué contre la couche sensible. Employons une plaque panchromatique et un verre jaune afin de compenser la plus petite sensibilité pour les couleurs les moins réfrangibles.

Le négatif porte donc juxtaposés trois négatifs rayés qui correspondent aux trois couleurs rouge, vert, violet; c'est-à-dire dont les noirs sont d'autant plus intenses que l'objet est plus rouge, plus vert, plus violet.

Obtenons un positif par contact. Appliquons le réseau trichrome sur ce positif; *en le plaçant convenablement*, *nous rétablissons les couleurs de l'original*. Cela tient à ce que l'œil placé à une distance suffisante ne distingue plus les raies; la rétine *additionne* les sensations qui se produisent sur des éléments voisins.

La difficulté du procédé est dans le réglage du réseau. Si les traits sont au nombre de 70 centimètres, chaque trait a une épaisseur de 0,14 millimètre : le réglage du réseau sur le positif doit être effectué à une approximation de l'ordre d'une fraction de dixième de millimètre.

344. Photographie des couleurs, méthode pigmentaire.

Voici le procédé de Ducos de Hauron réalisé par MM. Lumière.

1° — Des grains de fécule de pomme de terre ayant de 15 à 20 microns de diamètre, sont divisés en trois lots qu'on teint respectivement *en rouge orangé, en vert, et en violet.* Nous reviendrons plus loin sur ce qu'il faut entendre par là. Toujours est-il que les grains *rouge orangé* laissent *principalement* passer les rouges et les orangés, et absorbent notablement ou complètement les autres couleurs; de même *mutatis mutandis* pour les grains verts et violets.

Une fois les poudres colorées et desséchées, on les mélange en proportion telle que la poudre obtenue soit incolore par transmission. On étend cette poudre sur une lame de verre recouverte d'un enduit poisseux : *on arrive à obtenir une couche de grains se touchant tous, sans vide ni superposition.* On constitue ainsi un écran dans lequel chaque millimètre carré contient 8 à 9 000 petits écrans élémentaires.

On isole par un vernis la couche colorée; on superpose une couche d'émulsion panchromatique au gélatinobromure.

2° — On expose dans la chambre noire, en tournant le verre au-devant de la lumière. On place un écran jaune devant l'objectif, afin de compenser la sensibilité toujours plus grande de l'émulsion pour les violets (§ 178).

Les rouges et couleurs voisines impressionnent la plaque sous les écrans rouges; les verts l'impressionnent sous les écrans verts, les violets sous les écrans violets.

Développons ET FIXONS à la manière ordinaire. Nous avons comme *négatif* une image colorée qui, vue par transparence, est *complémentaire* de l'objet; en effet l'argent réduit forme écran opaque derrière les écrans colorés transparents qui ont laissé passer de la lumière. La lumière blanche, qui sert à l'éclairage par transparence, est d'autant plus privée de rouge, par exemple, que le rouge existait en grande quantité dans la lumière émise par l'objet.

3° — Le problème revient donc à inverser le cliché, à le transformer en un positif : ce que nous réalisons par la méthode du § 282 dont l'ordre des opérations est légèrement modifié.

Développons MAIS NE FIXONS PAS.

Détruisons l'argent réduit par un bain de permanganate de potassium :

Eau (1 000 gr.), permanganate (2 gr.), acide sulfurique (10 cm³).

En dissolvant l'argent opaque, nous rétablissons la transparence initiale de la couche sensible. La quantité de bromure, qui subsiste en ses divers points, est d'autant plus faible qu'elle avait été d'abord plus attaquée, du bromure ayant été réduit à l'état d'argent proportionnellement à la quantité de lumière transmise par les écrans.

Continuons les opérations à la pleine lumière du jour.

Toute la couche est insolée. Développons. L'argent est réduit en

quantité d'autant plus grande que la couche est plus riche en bromure. Quand l'image est convenable, fixons.

Ce second développement rend la couche principalement opaque sous les écrans colorés qui dans l'exposition n'ont rien transmis. Nous réalisons ainsi un positif à partir du négatif initial; l'image est renversée. *Elle reproduit les couleurs de l'objet.*

345. Remarques sur le procédé précédent.

Ce procédé donne des résultats merveilleux; mais la reproduction des teintes est inexacte.

Elle l'est d'autant plus que la couleur est plus simple.

Photographions un spectre pur : nous obtenons trois bandes *monochromes* séparées par des intervalles obscurs. Cela signifie que les écrans orangés ne laissent passer que les radiations de longueurs d'onde comprises entre λ_1 et λ_2; les écrans verts que les radiations allant de λ_3 à λ_4, les écrans violets que les radiations allant de λ_5 à λ_6, les longueurs d'onde se rangeant dans l'ordre inverse des indices.

De sorte qu'il existe deux bandes sombres allant de λ_2 à λ_3, de λ_4 à λ_5.

Dans les premières plaques mises dans le commerce, la première bande (dans le jaune) avait une épaisseur énorme.

Les plaques étant opaques pour ces bandes, si l'on photographie des teintes voisines, elles sont entièrement dénaturées. C'est, par exemple, ce qui arrivait avec les premières plaques pour les fleurs *jaunes d'or.*

Suivant la teinture des grains de fécule, on obtient des résultats les plus divers. On doit tenir compte à la fois des teintes des grains et de la sensibilité des plaques, qui est loin d'être uniforme, même pour les plaques panchromatiques : d'où, comme nouvelle arbitraire, un écran atténuant certaines couleurs.

Bref, les résultats sont attrayants, mais sans prétention à l'exactitude.

Dans le plan représentatif des couleurs, plaçons les trois points qui représentent les teintes des trois espèces de grains : on n'obtiendra jamais de teintes *plus saturées* que celles contenues dans le triangle formé par ces points. Généralement ces teintes sont loin d'être *saturées.*

Voici un singulier paradoxe.

Par des mélanges convenables de ces trois couleurs on obtient *tous* les points à l'intérieur du triangle, *par conséquent ceux qui correspondent aux bandes noires dont il est parlé plus haut.*

Supposons, pour préciser, qu'une de ces bandes comprenne la raie D.

La lumière du sodium ne donne rien; mais une lumière *complexe* ayant même teinte que la raie D, est reproduite assez exactement.

Deux couleurs de même teinte et de compositions différentes sont généralement traitées de manières très différentes par le procédé photographique que nous venons de décrire.

Cette méthode de photographie des couleurs a le grave défaut de ne donner qu'*une* épreuve et une épreuve *visible seulement par transpa-*

rence. Nous attendons qu'on nous fournisse le moyen de les reproduire en un nombre quelconque d'épreuves sur substratum opaque.

346. **Procédé de Poitevin pour la photographie des couleurs.** Je ne parlerai pas ici de la méthode de Becquerel qui donne des couleurs de lames minces; je renvoie sa description au Cours sur *les Interférences et la Diffraction*.

Je me borne à la méthode de Poitevin.

La voici réduite à sa partie essentielle.

On commence par préparer du papier au chlorure d'argent (papier trempé 2 minutes dans une solution de sel marin à 10 p. 100, puis une minute dans une solution de nitrate d'argent à 10 p. 100). Avec un pinceau, on applique à sa surface une solution à 5 p. 100 de bichromate de potassium (Poitevin adjoignait du sulfate de cuivre et du chlorure de potassium, mais il déclare que ce n'est pas essentiel). On fait sécher à l'abri de la lumière le papier; il se conserve plusieurs jours.

On l'expose sous des peintures transparentes sur verre, ou encore on projette dessus un spectre pur. Le papier est peu sensible, il l'est davantage s'il est humide. Les couleurs sont reproduites avec une certaine fidélité.

CHAPITRE VII

LOIS DES ACTIONS PHOTOCHIMIQUES

347. Exemple de travail académique.

1° — Il est essentiel de nous rendre compte de la difficulté des expériences pour ne pas admettre sans discussion les lois simplistes qu'on propose de temps à autre.

Je citerai d'abord un exemple caractéristique de travail académique.

G. Lemoine étudie l'action de la lumière sur le mélange de perchlorure de fer et d'acide oxalique en solution aqueuse :

$$Fe^2Cl^6 + (COOH)^2 = 2FeCl^2 + 2HCl + 2CO^2.$$

Pour doser le chlorure ferreux, il traite la solution exposée à la lumière par du carbonate de chaux qui fixe l'excès des réactifs, puis par le permanganate de potassium titré.

G. Lemoine déclare que *la décomposition chimique, au moins comme première approximation, est proportionnelle à l'intensité lumineuse.*

Voici les quantités trouvées et calculées.

Quantités trouvées	0,54	0,251	0,146
Quantités calculées	0,50	0,25	0,125
Erreur	8 p. 100	terme de comparaison	17 p. 100

On nous présente donc comme première approximation une loi vérifiée par *deux* expériences, dont les résultats diffèrent respectivement de 8 et de 17 p. 100 de ce qu'ils devraient être. Tous les expérimentateurs dignes de ce nom trouvent au contraire qu'il n'y a pas proportionnalité : *le plus souvent la quantité de matière décomposée croît moins vite que l'intensité*; nous en verrons du reste la raison.

« L'expérience montre, ajoute G. Lemoine, que la réaction n'éprouve pas sensiblement de retard au début et qu'elle cesse, ou à très peu près, avec la suppression de la lumière. Des déterminations comparatives faites avec une lumière continue ou intermittente donnent les mêmes résultats si la durée totale de l'insolation effective est la même. »

Voici par curiosité les nombres qui établissent la « loi ».

Temps de pose 20 minutes; durée d'interruption 1 minute.

Éclairement continu	485 , 365	moyenne	425
— discontinu	445	moyenne	445

La moyenne 425 est très peu inférieure 445, ajoute notre savant.

Ces expériences ne prouvent évidemment rien ; nous verrons que *sans aucun doute les interruptions influent sur le résultat*; mais les phénomènes préparatoires ou qui se produisent une fois la lumière enlevée, ont des durées extrêmement variables suivant le réactif dont on se sert et la manière de l'employer.

Reportez-vous maintenant au résumé que donne le *Journal de Physique* du mémoire de G. Lemoine (3e série, tome VI).

Dongier nous apprend sans atténuation que :

la décomposition est proportionnelle à l'intensité;

la réaction ne dure que le temps de l'insolation.

Voilà comment on fait des mémoires, comment on les analyse et comment les *vérités* scientifiques passent dans l'enseignement!

2° — J'insiste, non certes pour le plaisir trop facile de montrer l'inintelligence d'un membre de l'Institut, mais parce qu'il est souhaitable que les physiciens ne continuent pas à perdre leur temps. Il y a près de vingt-cinq ans que, dans un mémoire *Sur les actions photographiques*, je les mettais en garde contre les lois simples : elles sont ici tellement invraisemblables que, pour les admettre, il faudrait des preuves convaincantes et multipliées. L'intérêt de la question n'est pas dans l'énoncé d'une action photochimique de plus (nous les connaissons par centaines), ni dans la détermination chimique des corps qui se produisent (c'est l'affaire du chimiste et non du physicien), ni dans la construction de photomètres absolus (ils ne le sont pas ni ne peuvent l'être).

L'intérêt de la question réside précisément dans ces problèmes que G. Lemoine résout avec la maestria qu'on a vue.

Comment varie la réaction quand l'intensité varie? dans quels cas s'emballe-t-elle et pour quelle cause? dans quels cas se limite-t-elle automatiquement?

Comment influent les interruptions? Existe-t-il une sorte de température chimique, ainsi que mon travail me conduisait à le poser?

Pour quelles raisons certaines radiations agissent-elles après certaines autres et non avant? etc., etc....

Pour résoudre ces problèmes, il faut beaucoup de conscience, de temps et d'habileté. Il faut surtout planter là les méthodes de mesure approximatives et mal définies. Je vais montrer pour quelles raisons ils se posent comme je viens de le dire; je résumerai ensuite mon mémoire qui, bien que ou parce que refusé comme thèse par ces messieurs de la Sorbonne, est un travail honnête et, j'ose dire, intelligent.

348. **Complexité du phénomène.**

1° — L'expérience la plus simple que nous puissions imaginer est la suivante. On opère avec une lumière sinon monochromatique, du moins dont les radiations ont des longueurs d'onde peu différentes et *sont traitées à peu près de même par le réactif étudié.* Pour préciser, si le réactif montre au spectroscope des bandes d'absorption, on choisit les radiations au voisinage des maximums ou des minimums du coefficient d'absorption.

Cette lumière quasi monochromatique traverse une cuve à faces parallèles dont on connaît et dont on peut faire varier l'épaisseur l; la section du faisceau est d'un nombre connu de centimètres carrés.

Soit I_0 l'intensité incidente.

Après la traversée d'une couche d'épaisseur x, l'absorption réduit à :

$$I = I_0 \exp(-\alpha x);$$

α est le coefficient d'absorption. La quantité du réactif décomposée en chaque point dans l'unité de temps (en réduisant les hypothèses à leur plus extrême simplicité) est une fonction de la concentration c et de l'intensité I. De sorte que la quantité totale décomposée dans l'unité de temps est de la forme :

$$Q = \int_0^l f(c, I)\, dx = \int_0^l f[c, I_0 \exp(-\alpha x]\, .\, dx.$$

Les radiations actives sont, non pas nécessairement les plus absorbées ni les seules absorbées; elles se trouvent simplement parmi les radiations absorbées. Autrement dit, pour qu'elles agissent, il est nécessaire que le milieu ne soit pas pour elles *parfaitement* transparent. Mais le milieu peut être opaque pour des radiations sans qu'elles agissent.

Quoi qu'il en soit, la détermination du coefficient d'absorption est si difficile, nous sommes *a priori* dans une si complète ignorance de la fonction f, qu'il est illusoire de chercher à appliquer la formule sinon dans des cas très particuliers.

2° — On est ainsi conduit à prendre ou bien une cuve à faces parallèles extrêmement mince, ou bien une cuve si épaisse que toute la lumière active soit absorbée.

Dans le premier cas la décomposition est trop faible pour être dosée par les procédés *chimiques* (je ne dis pas qu'elle est indosable par tous les procédés); dans le second cas, on introduit une quantité considérable de réactif inerte ou quasi tel, d'où encore un dosage difficile.

3° — La complexité ne s'arrête pas là.

A mesure que la réaction s'opère, le milieu change de nature. Non seulement l'absorption varie, mais des corps apparaissent qui modifient l'intensité de l'action lumineuse, qui peuvent même l'arrêter. D'où la nécessité d'introduire des corps qui éliminent à mesure les produits de

la réaction : c'est le rôle joué par les matières organiques (cellulose, amidon, gélatine...) dans bon nombre de procédés ci-dessus décrits.

Le lecteur comprend maintenant pourquoi nous possédons si peu de renseignements quantitatifs certains sur les effets de la lumière.

Les dosages chimiques sont incapables d'une précision suffisante; seuls les dosages physiques sont susceptibles de différencier des résultats très voisins. Mais ces dosages demandent un matériel considérable et des connaissances étendues.

On trouve des gens qui pendant des années consentent à se servir d'un photomètre pour (censément) étudier un climat, mais qui n'useraient pas six mois pour étudier leur photomètre. D'où un amoncellement de mémoires qu'il est infiniment préférable d'ignorer. Malheureusement, et c'est une preuve déplorable de l'influence allemande, on veut découvrir des lois simples, générales, dans un minimum de temps qui oscille entre quinze jours et un mois.

Ce n'est pas ainsi qu'on débrouillera le sujet qui nous occupe.

349. **Nature de l'action lumineuse. Déclanchements.**

1° — La première question, et fondamentale, est de savoir si l'énergie nécessaire pour réaliser la réaction est ou non empruntée à la lumière.

Précisons par une comparaison, grossière si l'on veut, mais parfaitement intelligible. Un âne tire une voiture, il reçoit des coups de fouet de son conducteur : la lumière joue-t-elle le rôle de l'âne ou le rôle du conducteur?

Remarquez que si l'âne manque de bonne volonté, s'il n'avance qu'à coups de fouet, il existe une quasi proportionnalité entre le chemin parcouru et le nombre des coups de fouet. Tout de même, si les coups sont en un sens la cause du chemin parcouru, personne ne cherchera une équivalence entre le travail dépensé par le conducteur pour mouvoir son fouet et le travail fourni par l'âne. Si même l'âne est soucieux de ses devoirs, un coup de fouet suffira pour qu'il abandonne le pré dont il tond l'herbe, et qu'il marche noblement jusqu'à extinction de chaleur naturelle; le travail du bras du conducteur devient insignifiant.

Un cas cependant permettrait d'assigner au conducteur le rôle prépondérant, celui où l'âne serait paralytique et où par surcroît la voiture devrait remonter une côte : si effectivement elle remonte la côte, c'est le conducteur qui a tout fait.

Le problème du rôle de la lumière dans les réactions dont elle est l'occasion ou la cause, problème posé voici plus de quatre-vingts ans, se divise donc naturellement en deux, suivant que rien n'empêche les réactions de se produire spontanément, ou qu'elles ne peuvent se produire qu'en raison d'une aide extérieure.

Précisons ce que cela signifie.

2° — Tout d'abord que dit la Thermodynamique classique en présence s *déclanchements?* Elle répond que cela ne la regarde pas.

Comme l'a maintes fois expliqué Duhem, quand elle déclare qu'une modification est impossible, la modification ne se produit pas; mais quand elle déclare qu'une modification est possible, il ne faut pas la croire sur parole. Autrement dit, tous les états d'équilibre qu'elle prévoit, se réalisent; mais il est facile de réaliser des états d'équilibre qu'elle ne prévoit pas.

Les déclanchements font précisément cesser ces équilibres *métastables*.

Mettons de l'hydrogène et du chlore dans un ballon. La Thermodynamique classique nous dit qu'il va se former de l'acide-chlorhydrique; nous savons que dans l'obscurité il ne se produit rien. Plaçons le ballon au soleil; la réaction est déclanchée : il y a explosion. Si même le mélange est composé rigoureusement de volumes égaux des deux gaz, la lumière diffuse du jour suffit à produire le déclanchement.

A priori le travail nécessaire pour le déclanchement n'a absolument aucune relation avec le travail de la réaction. Il est donc faux de comparer le rôle excitateur de la lumière au rôle du tiroir dans une machine à vapeur, puisque si on arrête le tiroir, la machine s'arrête; tandis que l'on connaît un grand nombre de réactions qui, une fois amorcées par la lumière, continuent toutes seules. C'est justement ce qui fait l'excellence de ma comparaison : il n'y a aucun rapport de quantité entre le coup de fouet et le travail accompli par l'âne.

3° — Montrons comment les choses peuvent se passer par une comparaison d'aspect plus scientifique.

Dans un verre mettons du champagne ou de l'eau de seltz; le liquide mousse; au bout de quelques minutes le gaz qui sursature le liquide, cesse de se dégager. Projetons une pincée de sable; une certaine quantité de bulles apparaît: puis tout s'arrête. Pour avoir un dégagement continu de gaz, il faut projeter par minute un nombre de grammes déterminé de sable. Il n'y a évidemment aucun rapport énergétique entre le travail que produit le sable et le dégagement du gaz. Il existe cependant une proportionnalité très approchée entre la masse du sable et celle du gaz qui se dégage. Du reste suivant que le sable a été calciné ou exposé à l'air, le résultat quantitatif est tout différent.

J'ignore si l'expérience a été faite; mais il se pourrait qu'en ébranlant le liquide avec une amorce de fulminate, on produise une véritable explosion; que tout le gaz à l'état de solution sursaturée soit éliminé d'un coup. Le déclanchement est général tandis que dans le premier cas il est local et ne porte que sur une petite quantité de réactif. Pour mieux dire, dans le premier cas il est incapable de se propager.

4° — Je dis ci-dessus que bon nombre de réactions une fois amorcées par la lumière continuent toutes seules.

On enduit un papier d'une solution aqueuse de chlorure d'or (§ 299); il ne change pas de couleur dans l'obscurité. On l'expose un instant aux rayons solaires. Alors que la partie insolée ne montre qu'une coloration

à peine reconnaissable, on remet le papier dans l'obscurité : *la réduction du sel continue, le papier noircit.* Des résultats analogues ont été obtenus avec les divers sels d'or par Seebeck, Becquerel et Herschel.

L'expérience est très curieuse avec un spectre pur.

On expose le papier (qui est peu sensible) pendant une heure sous un spectre pur intense ; le noircissement n'est pas reconnaissable.

On enferme le papier plusieurs jours dans une boîte ; au bout de ce temps on constate un noircissement net entre les raies E et I.

Voici longtemps que Regnault signalait l'expérience suivante. On fait arriver simultanément dans un ballon de la vapeur de chlorure d'éthyle C^2H^5Cl (il bout vers 12°) et du chlore. Le ballon est exposé au soleil, *au moins au commencement de l'expérience*; *car une fois la réaction établie, elle continue à l'ombre et ne s'arrête même pas quand le jour vient à tomber.*

Il se forme une série de produits de substitution parmi lesquels la liqueur des Hollandais $C^2H^4Cl^2$. La chloruration peut aller jusqu'à C^2Cl^6.

On trouve dans le travail de Regnault de nombreux exemples d'action de la lumière dans la formation des produits de substitution ou d'addition du chlore ; l'expérience classique et la formation de l'acide chlorhydrique n'est qu'un cas très particulier. Regnault étudie par exemple l'action du chlore sur le chlorure de méthyle CH^3Cl, qui est comparable à l'action sur le chlorure d'éthyle.

L'action du chlore sur les oxydes de méthyle $(CH^3)^2O$ et d'éthyle $(C^2H^5)^2O$ fournit d'autres exemples. Au point de vue photochimique on trouverait là des sujets d'études intéressantes.

5° — Resterait à déterminer le mécanisme du déclanchement.

Dans certains cas probablement la lumière produit en très petite quantité un corps dont la présence rend nécessaire la réaction ; elle engendre une sorte de *catalyseur.*

Dans d'autres cas, la mise en branle de quantités petites de réactifs amène un échauffement local facilitant la réaction....

Mais, et c'est sur quoi j'insiste, quel que soit le mécanisme du déclanchement, il est clair qu'aucune relation déterminée n'existe entre l'énergie lumineuse que reçoit le système et l'importance des effets produits.

350 **Déclanchement et continuation d'une réaction photochimique.**

1° — Voici l'expérience de Becquerel, utile à rapporter dans ses termes ou à peu près, parce qu'elle est ordinairement mal interprétée.

a) On étend du chlorure d'argent sur du papier blanc ; on projette dessus un spectre pur. Le noircissement commence dans l'extrême violet entre les raies H et G ; il s'étend dans le bleu jusqu'en F, et de l'autre côté au delà du violet visible.

b) Le chlorure préparé dans une chambre noire, est exposé pendant un temps *très court* à la lumière diffuse ou solaire directe (de manière

qu'il ne soit pas noirci). Quand on projette dessus le spectre, le noircissement se produit alors jusqu'au rouge extrême.

Sans établir de distinction absolue entre les radiations, on peut dire que la matière sensible qui a reçu un commencement d'impression, est une autre matière puisqu'elle est devenue aussi sensible à l'action des radiations moins réfrangibles qu'elle l'était précédemment à l'action des radiations plus réfrangibles.

Ainsi l'expérience prouve, non pas qu'il existe d'une manière absolue des rayons *excitateurs* et rayons *continuateurs* (ce qui est grossièrement erroné), mais que l'action des radiations d'une certaine longueur d'onde et *d'une certaine intensité* dépend de l'état dans lequel se trouve *actuellement* la matière sensible, par suite du traitement lumineux qu'elle a subi.

Nous généralisons ainsi l'idée de déclanchement. Certaines réactions déclanchées par la lumière continuent sans son aide; d'autres réactions exigent pour continuer une aide plus faible qui peut venir de radiations d'autres longueurs d'onde, ou de radiations de même longueur d'onde mais d'intensité moindre (§ 366).

L'expérience réussit avec le chlorure et le bromure d'argent préparés *in vitro* et étendus sur le papier, ou avec ces mêmes sels précipités par l'azotate d'argent dans le papier enduit d'une solution de NaCl ou de KBr.

2° — Si quelqu'un d'intelligent s'avise de soutenir la théorie des rayons excitateurs et continuateurs telle qu'elle se trouve partout, qu'il médite les expériences suivantes répétées par Becquerel lui-même.

La résine de gaïac est soluble dans l'alcool. Un papier imprégné de cette solution (par suite blanc jaunâtre) et exposé sous un spectre pur, bleuit au delà de H avec un maximum vers la raie M. Au contraire si l'on projette un spectre pur sur un papier au gaïac uniformément bleui à la lumière, il redevient blanc depuis A jusqu'à H; le maximum d'action est en F.

Becquerel et Wollaston concluent que les rayons agissent en sens contraires suivant leurs longueurs d'ondes; les plus réfrangibles facilitent l'oxydation, les moins réfrangibles amènent la réduction.

On sait que les radiations les plus réfrangibles réduisent les sels ferriques à l'état de sels ferreux; il paraît que les radiations les moins réfrangibles produisent une réaction inverse On avouera que c'est une étrange manière de *continuer* l'action des premiers.

Dans les expériences précédentes, les radiations les plus réfrangibles étant aussi les plus actives, la lumière blanche agit comme elles.

3° — Expériences postérieures a Becquerel.

Les expériences sur les rayons soi-disant excitateurs et continuateurs ont été reprises toujours avec un admirable désordre dont un mémoire de Villard donne le modèle.

En définitive les faits se résument en disant que *les radiations ont des*

actions qui varient avec la longueur d'onde et le traitement préalable du système sur lequel ils agissent. Les expériences de Becquerel établissent le fait sans contestation possible : il arrive que les rayons rouges continuent l'action des violets; il se peut qu'ils la détruisent. Outre les faits indiqués ci-dessus, le lecteur relira le paragraphe 331. Mais il est absurde de partir de là pour les appeler continuateurs ou destructeurs; le fait seul d'accoupler ces mots devrait mettre les physiciens sur leurs gardes : cela ressemble un peu trop au sabre de M. Prudhomme qui servait à des fins contradictoires. Les rayons ne sont pas continuateurs ou destructeurs absolument parlant; ils ne le sont que suivant les cas particuliers, parce que leurs actions se trouvent de même sens ou de sens contraire des actions antérieures. J'ai montré (§ 366) par exemple que *pour un faisceau monochromatique* une faible intensité succédant à une grande intensité produit plus d'effet que la même grande intensité succédant à la petite : dira-t-on que la même radiation est continuatrice ou non suivant l'intensité du faisceau utilisé? On dira seulement que sur la matière *préparée* la petite intensité a relativement plus d'effet que la grande. Répétons que *le second faisceau n'agit pas sur la même matière que le premier.*

4° — Au surplus quand on parle de destruction, il faudrait y regarder à deux fois et définir ce qu'on entend par là. Cela signifie-t-il que la matière revient dans son état premier? cela signifie-t-il seulement que la matière noircie redevient incolore? La question est d'importance puisqu'elle sous entend l'autre question de savoir si les réactions dues à la lumière sont seulement de la nature de celles que la Thermodynamique classique déclare possibles, en particulier de celles que Berthelot appelait *exothermiques.*

351. Variation du coefficient d'absorption.

Un procédé semble devoir nous apprendre si une quantité d'énergie appréciable est absorbée du fait que la lumière entretient une réaction chimique. Supposons possible de déterminer le coefficient d'absorption pour une radiation active, *quand elle agit et quand elle n'agit pas* : ce coefficient sera plus grand quand elle agit, à supposer que la lumière ne se borne pas à déclancher.

C'est ainsi que G. Lemoine pose le problème : est-il nécessaire de montrer qu'il n'a rigoureusement aucun sens?

Sur un mélange d'une solution de perchlorure de fer (rouge) et d'une solution d'acide oxalique (incolore), nous ne pouvons déterminer, pour une radiation donnée, qu'un coefficient d'absorption, celui qui correspond à l'action photochimique, *puisque nous n'avons aucun moyen de faire passer un faisceau à travers le mélange sans qu'il agisse.* G. Lemoine tourne la difficulté en posant, *ce qui est gratuit*, que l'absorption n'est pas modifiée quand on remplace l'acide oxalique par de l'eau : il compare donc l'absorption par le mélange des solutions à

l'absorption par la solution de même teneur en perchlorure d'où l'acide oxalique est supprimé. Qui ne voit le cercle vicieux? De quel droit affirmer que la présence d'une solution *même incolore* d'acide oxalique ne change pas l'absorption par le perchlorure?

En définitive quand le faisceau traverse le mélange des solutions, il est absorbé; c'est un fait. Quant à dire à quoi sert l'énergie absorbée, nous n'en savons rien. Nous ignorons quelle fraction de cette énergie est utilisée pour le déclanchement. Au surplus ce qui domine le phénomène est non pas assurément la quantité d'énergie absorbée, mais la forme sous laquelle elle est absorbée, puisque à énergie égale absorbée, la longueur d'onde influe énormément sur l'activité des radiations.

352. Autolimitation des actions photochimiques.

Dans bien des cas l'action de la lumière est autolimitatrice. Quand, par exemple, du chlorure d'argent est réduit, du chlore est mis en liberté. Si rien ne l'élimine à mesure de sa formation, il arrête la réduction par sa tendance à produire une réaction contraire. On sait, en effet, que le chlorure d'argent parfaitement pur et sec n'est quasiment pas altéré par la lumière. La vapeur d'eau facilite la réaction en éliminant le chlore (il se forme de l'acide chlorhydrique) et en rendant l'ensemble des opérations plus exothermique. Tel est le rôle des *sensibilisateurs photographiques* (ammoniaque, azotate d'argent,...).

353. Réactions endothermiques.

Existe-t-il des réactions que la Thermodynamique classique déclare spontanément impossibles dans des conditions déterminées de température et de pression, et que la lumière rend possibles dans ces conditions? Je ne dis pas : existe-t-il des réactions *endothermiques* que la lumière rend possibles, parce que ce serait admettre le principe du Travail maximum de Berthelot que nous savons erroné : rien n'empêche certaines réactions endothermiques de se produire spontanément (voir Thermodynamique, I, § 106).

J'avoue n'avoir trouvé nulle part de renseignements à ce sujet.

Plusieurs physiciens affirment que la lumière n'est pas capable de réaliser de telles réactions; son rôle se bornerait à déclancher des réactions qui ne demandent qu'à se produire; les systèmes modifiés sont dans un état d'équilibre métastable.

Il se pourrait toutefois que la lumière intervînt d'une façon ou d'une autre pour modifier les conditions d'équilibre; pour déterminer ces conditions, l'état d'*agitation* dans laquelle elle met les molécules serait une variable qu'il faudrait ajouter à la pression et à la température.

On sait que *sous l'influence de la lumière*, les plantes effectuent le travail nécessaire pour décomposer l'anhydride carbonique dans la respiration végétale. Mais jusqu'à présent du moins, on n'a pu réaliser la réaction *in vitro*. Les radiations rouges et jaunes qui sont particuliè-

rement actives, font seulement œuvre de déclancheur : c'est la plante qui produit le travail.

Assurément la décomposition du chlorure d'argent en chlore et argent est endothermique : reste à savoir si elle est possible isolément. L'expérience semble répondre par la négative.

Étude quantitative de quelques réactions.

354. **Expériences de Bunsen et Roscoë.**

1° — Le premier travail correct sur les actions chimiques de la lumière (Bunsen et Roscoë) date de 1855.

C'est un modèle qu'on s'est du reste bien gardé d'imiter.

Le système soumis aux rayons d'une lampe à gaz est constitué par le mélange à volumes égaux de chlore et d'hydrogène, mélange saturé de vapeur d'eau à la température de l'expérience.

Le mélange de chlore et d'hydrogène est obtenu par l'électrolyse avec des électrodes de platine d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique de densité 1,148. L'expérience montre qu'il ne contient ni oxygène, ni acide hypochloreux. Le mélange bien lavé arrive dans l'appareil que représente la figure 248. Il barbote dans l'eau du renflement *laboratoire* B, passe dans le tube mesureur EE et s'échappe après barbotage dans l'eau de la boule D.

Le volume de B est d'une dizaine de centimètres cubes.

Supposons qu'un passage assez long ait saturé de chlore et d'hydro-

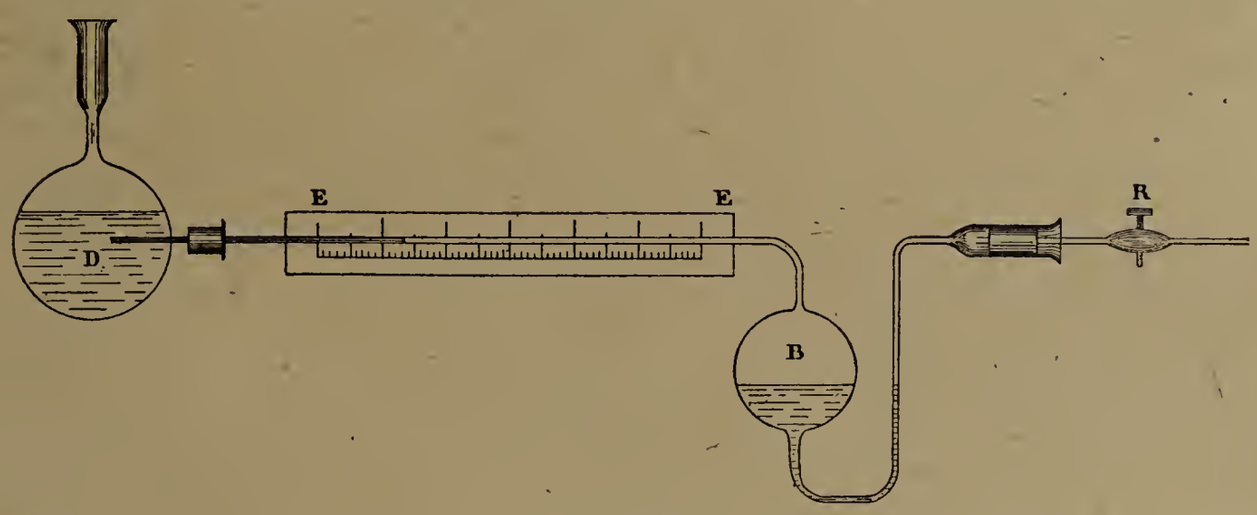


Fig. 248.

gène tous les liquides laveurs et ceux des ballons B et D, de manière que le mélange gazeux dans B soit à volumes égaux. Pour faire une expérience, on ferme le robinet R, on fait agir la lumière sur le mélange gazeux contenu dans B. Le chlore et l'hydrogène se combinent, l'acide chlorhydrique formé se dissout; de l'eau rentre du ballon D dans le tube EE. On mesure le volume du mélange gazeux disparu par le déplacement de la colonne liquide.

2° — Bunsen et Roscoë se servaient comme source lumineuse d'une lampe à gaz. La pression du gaz était rendue constante; pour régulariser l'écoulement, ils interposaient sur la canalisation un réservoir de grande capacité. *La lumière émise était tamisée par une couche d'eau.*

Ils reconnurent d'abord que l'action chimique dépend de la nature de la flamme. Si on diminue son éclat en mélangeant de l'air au gaz, les propriétés photochimiques décroissent. La coloration de la flamme due à une quantité minime de matières étrangères influe considérablement. A la flamme rendue obscure par une arrivée convenable d'air, flamme que nous savons inactive, on rend son activité au moyen de chlorure de cuivre ou d'antimoine. Par contre, les chlorures de strontium et de lithium (coloration rouge), de potassium ou de sodium (coloration jaune) sont sans effet. L'action chimique est donc au premier chef une fonction de la longueur d'onde.

La composition du mélange gazeux a une grande importance. Si, avant de commencer l'expérience, le courant gazeux ne passe pas assez longtemps dans l'appareil, le chlore étant beaucoup plus soluble que l'hydrogène, la composition ne correspond pas à la formule HCl : la sensibilité du mélange est affaiblie dans une proportion énorme. Le raisonnement par lequel, de l'existence d'un maximum d'action pour la composition HCl, on conclurait qu'il est indifférent de modifier la composition pourvu qu'elle reste voisine de HCl (ce qui est vrai en général au voisinage d'un maximum), est donc ici entièrement faux.

De même la moindre rentrée d'air modifie les résultats du tout au tout.

Le mélange de composition HCl est extraordinairement sensible : la lumière diffuse d'un ciel nuageux en provoque l'explosion.

Les mesures étant volumétriques, la température intervient. On trouve qu'une fois la lumière arrêtée, la colonne liquide progresse encore quelques secondes : on doit attribuer le phénomène à l'échauffement antérieur qui résulte de la combinaison, échauffement qui exige pour disparaître un temps pendant lequel le mélange se contracte.

355. **Induction photochimique.**

1° — Bunsen et Roscoë découvrirent un phénomène capital qu'ils nommèrent *induction photochimique.*

La combinaison du chlore et de l'hydrogène est d'abord extrêmement lente; elle s'accélère peu à peu, quelque constante que soit la source lumineuse utilisée, et tend vers une vitesse asymptotique. Il est infiniment remarquable que le temps nécessaire pour atteindre la vitesse constante se chiffre *en minutes* (fig. 249).

Soit Q la quantité totale des gaz combinés au bout du temps t (ou, si l'on veut, le déplacement total de la colonne liquide qui mesure la combinaison). La vitesse $dQ : dt$, d'abord nulle jusqu'au temps T_1,

croît et tend vers une valeur limite, qu'elle atteint pratiquement au temps T_2 : la courbe $Q = f(t)$, est alors une droite.

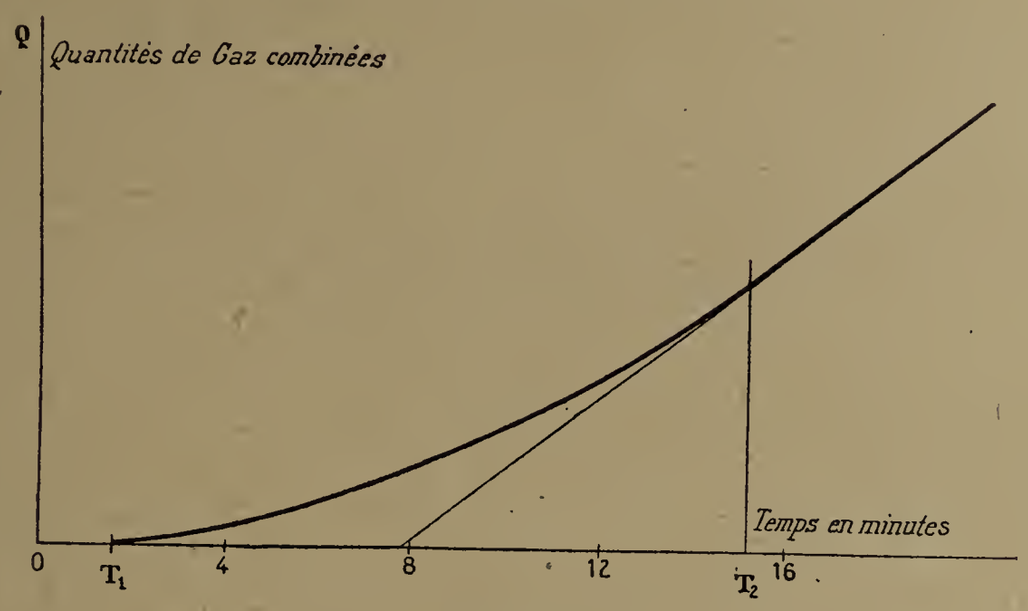


Fig. 249.

2° — Supposons la vitesse limite atteinte. Supprimons la lumière pendant une minute; rétablissons-la. La vitesse de combinaison est redevenue plus petite qu'elle n'était; il lui faut un certain temps pour reprendre sa valeur limite antérieure. La modification due à la lumière et qui rend possible la combinaison, disparaît donc dans l'obscurité.

3° — Les temps T_1 et T_2 au bout desquels la vitesse de combinaison cesse d'être nulle et devient constante, diminuent quand croît l'intensité de la lumière. Le temps T_1 diminue plus vite que le temps T_2; autrement dit, pour une intensité suffisante, l'action commence immédiatement, mais le temps au bout duquel la vitesse devient constante, reste encore relativement grand.

4° — Bunsen et Roscoë ont montré que le chlore gazeux est très absorbant pour les radiations qui provoquent la combinaison. Une épaisseur de 17 centimètres à la pression ordinaire suffit pour réduire l'action au dixième de sa valeur. L'hydrogène est peu absorbant.

Il est dès lors facile d'expliquer pourquoi, quand l'épaisseur du mélange dans le sens de la lumière est grande, la combinaison est loin de croître proportionnellement à la masse sur laquelle l'action s'exerce. D'une part en raison de l'absorption, la lumière agit moins sur les couches postérieures que sur les couches antérieures; de l'autre, l'aptitude à la combinaison développée sur les couches antérieures par une lumière intense disparaît quand, en vertu du mouvement des molécules, elles passent dans les couches postérieures.

Il sera donc bon d'opérer sur des couches peu épaisses.

356. Oxydation de l'acide oxalique.

L'acide oxalique en solution aqueuse est oxydé sous l'action de la

lumière en présence de réactifs qui se réduisent : d'où un grand nombre de soi-disant actinomètres.

On mesure le volume du gaz carbonique qui se dégage.

Par exemple, avec le perchlorure de fer on a (§ 303) :

$$Fe^2Cl^6 + (COOH)^2 = 2FeCl^2 + 2HCl + 2CO^2.$$

Il y a maximum d'action entre les raies F et G, c'est-à-dire dans le bleu. Les quantités de gaz dégagées sont faibles (de l'ordre de 0,001 centimètre cube par centimètre carré de surface impressionnée et par minute d'exposition au plein soleil). Il faut tenir compte de la solubilité du gaz carbonique dans le liquide; d'où une série de dispositifs pour faciliter les lectures et les rendre plus précises.

On peut faire agir la lumière sur de l'oxalate ferrique acide qui se transforme en oxalate ferreux. Pour obtenir l'oxalate ferrique, on part de 100 grammes de sulfate ferreux qu'on oxyde par un mélange de 15 grammes d'acide nitrique et de 15 grammes d'acide sulfurique : on précipite l'oxyde ferrique par l'ammoniaque. On lave le précipité et on le dissout dans un excès d'acide oxalique (70 grammes dans un litre d'eau).

357. **Décomposition de l'iodure d'azote.**

Pour déterminer l'intensité lumineuse, Guyard propose d'utiliser la réaction de l'iode sur l'ammoniaque en solution aqueuse :

$$4AzH^3 + 3I = 3(AzH^4I) + Az.$$

De l'azote se dégage.

Malgré ce que je lis dans la note de l'auteur, je ne vois pas la possibilité de disposer une expérience quantitative qui exigerait évidemment la connaissance de la surface de l'iode sur laquelle tombe la lumière. Voici ce qui nous est dit : dans un matras à tube latéral, on introduit 1,27 gramme d'iode, et on remplit d'ammoniaque à 22°. Quand on expose à la lumière, il se dégage 33,5 centimètres cubes d'azote : la vitesse du dégagement est proportionnelle à l'intensité.

Au lieu de partir d'iode et d'ammoniaque, on peut partir d'iodure d'azote. Dans l'eau la décomposition à la lumière se fait d'abord tranquillement, mais se termine par une explosion.

Dans l'ammoniaque, elle est régulière jusqu'au bout.

C'est une singulière idée de chercher l'équivalent chimique ou mécanique de la lumière dans une réaction à ce point explosive. J'en parle comme offrant, paraît-il, un maximum de sensibilité dans le jaune et le minimum dans le violet. Au surplus la proportionnalité à l'intensité lumineuse est une clause de style; on se garde bien de nous dire sur quoi repose l'affirmation.

Étude des plaques au gélatinobromure d'argent.

358. Hétérogénéité des couches sensibles. Expériences croisées.

1° — Les plaques du commerce ne sont pas homogènes. Même en admettant que leurs propriétés varient d'une manière continue d'un bord à l'autre, il devient nécessaire de croiser les expériences quand on veut être sûr des résultats.

La figure 250 représente un cliché dont on a impressionné cinq régions égales et équidistantes : les régions 1, 1′, 1″, dans certaines conditions bien déterminées, les régions 2, 2′, dans d'autres conditions. On veut comparer les résultats.

Déterminons les noirs (§ 276) ; portons-les en ordonnées ; prenons pour abscisses les distances des milieux des régions impressionnées au bord gauche de la plaque.

Si la couche sensible était homogène, les points 1, 1′, 1″, seraient sur une horizontale, les points 2 et 2′ sur une autre horizontale. La couche étant hétérogène, ils sont respectivement sur des courbes I et II.

C'est la distance moyenne de ces courbes qui mesure la différence des résultats.

Par les trois points 1, faisons passer la parabole :

$$y = a + bx + cx;$$

Déterminons les distances verticales des points 2 et 2′ à cette parabole ; leur moyenne est la différence cherchée.

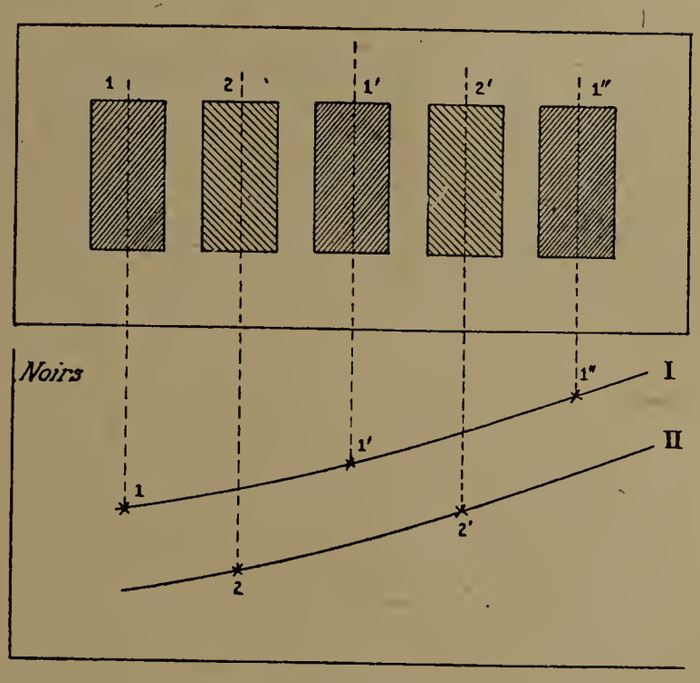


Fig. 250.

Outre l'hétérogénéité de la couche, cette méthode élimine les perturbations qui varient d'une manière continue (modification des sources lumineuses d'éclairement ou de mesure des noirs), à la condition que les cinq clichés soient obtenus à des intervalles de temps égaux et que leurs noirs soient également déterminés à des intervalles de temps égaux. C'est là un bon exemple d'expériences systématiquement croisées. Rien n'empêche de prendre 7 clichés au lieu de 5.

2° — Les calculs qui correspondent à cette méthode, sont très simples ; on les trouvera développés au § 545 des *Exercices de Mathématiques*.

Soient y_1, y', y''_1, les trois ordonnées des points 1, 1′, 1″ de la parabole I. Les ordonnées intermédiaires ont :

$$Y_1 = \frac{1}{8}\left(3y_1 + 6y'_1 - y''_1\right) \qquad Y'_1 = \frac{1}{8}\left(-y_1 + 6y'_1 + 3y''_1\right).$$

Les distances verticales des points 2 et 2′ à la parabole sont :

$$Y_1 - y_2 \qquad \text{et} \qquad Y'_1 - y'_2.$$

Leur moyenne est :

$$\frac{1}{8}\left(y_1 + 6y'_1 + y''_1\right) - \frac{1}{2}\left(y_2 + y'_2\right).$$

Le calcul en est donc rapide. Comme vérification, on trouve bien zéro si toutes les ordonnées sont égales.

3° — Dans les paragraphes suivants j'utilise les résultats d'expériences que j'ai faites en 1892 et 1893 et qui ont été publiées en 1894. J'ai présenté ce travail comme thèse en juillet 1893; est-il besoin de dire qu'il fut ignominieusement repoussé par la Sorbonne qui n'y comprit absolument rien? L'amusant est qu'à la même époque, Abney faisait en Angleterre des expériences par une méthode analogue, qui donnèrent des résultats concordants avec les miens et dont je n'avais du reste pas connaissance. Elles furent immédiatement déclarées géniales.

Que cet exemple serve aux débutants et leur apprenne en quelle estime il faut tenir l'opinion des pontifes!

359. Influence de l'éclairement et du temps de pose.

1° — Je rappelle la définition du noir.

On suppose la plaque impressionnée, développée, fixée et séchée.

Une source auxiliaire de lumière envoie sur une pile thermoélectrique à travers les parties de la couche non impressionnées un faisceau d'intensité I_0; elle envoie à travers les parties impressionnées un faisceau d'intensité I. Par convention le noir est :

$$N = \frac{I_0 - I}{I_0}.$$

$N = 0$, pour $I = I_0$: la couche n'est pas impressionnée;
$N = 1$, pour $I = 0$: la couche est opaque.

Le noir varie donc de 0 à 1.

2° — La courbe du noir en fonction des intensités (à pose constante) ou en fonction des poses (à intensité constante), a l'allure représentée par la figure 251. Si la pose est trop courte ou si l'intensité est trop petite, il ne vient rien : ce qu'indique la partie parabolique OA de la courbe.

La courbe a un point d'inflexion, puis tourne sa concavité vers l'axe des abscisses. Nous verrons plus loin que le noir diminue si l'intensité

ou la pose dépassent certaines limites. Il peut même diminuer avant d'atteindre sa valeur limite qui est 1.

360. **Noir en fonction de la quantité d'énergie $Q = Et$.**

On a énoncé la loi suivante (Becquerel) : « Que cent faisceaux de

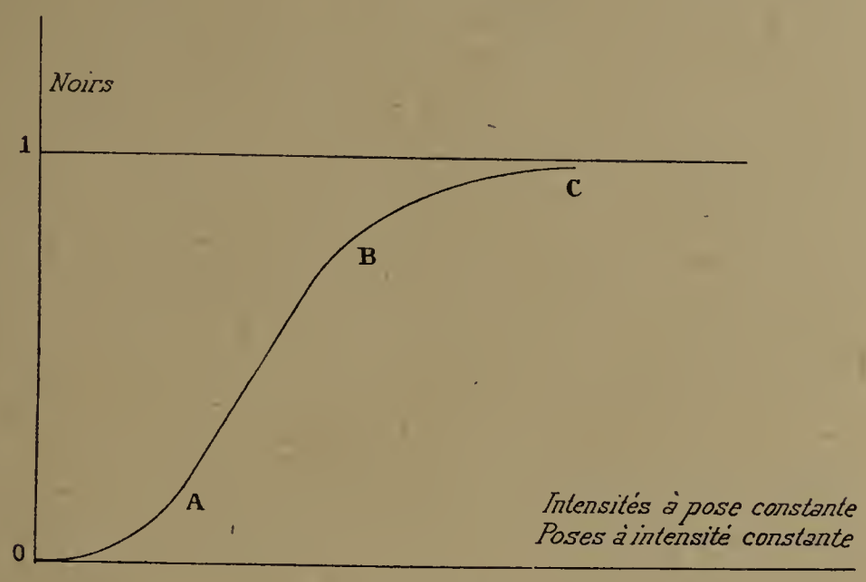


Fig. 251.

rayons égaux en premier viennent frapper la matière sensible ensemble ou successivement, elle recevra la même somme d'action chimique ». Cette opinion, soutenue par nombre de physiciens, en particulier par Janssen, est complètement erronée.

Soit E l'intensité *constante* du faisceau (ou ce qui revient au même, l'éclairement de la couche sensible). Soit t la durée de l'impression. D'après Becquerel et Janssen, le noir serait une fonction, non de E et de t séparément, mais du produit $Q = Et$; le noir serait représenté par une courbe unique en fonction de l'énergie déversée.

L'expérience montre, au contraire, qu'en fonction de Q le noir est représenté par un faisceau de courbes; pour une même valeur de Q, le noir croît quand le temps de pose diminue ou, ce qui revient au même, quand l'éclairement E augmente.

Conformément à ce résultat, on sait que les clichés sont d'autant plus *durs* que l'éclairage est plus grand, d'autant plus *gris* qu'il est plus faible.

361. **Relation du négatif et de l'objet photographié.**

Etudions la relation qui existe entre le négatif et l'objet. Montrons qu'elle est vague, et seulement acceptable en raison de la tolérance de l'œil, de notre ignorance des objets représentés et de la difficulté technique de comparer le modèle et le résultat.

1° — La définition du noir est arbitraire. Pour préciser, rien n'empêche, à la place de l'expression que nous avons choisie :

$$N = \frac{I_0 - I}{I_0}, \qquad \text{de prendre :} \qquad N = \frac{I_0 - I}{I},$$

comme je l'ai fait dans mon mémoire de 1893.

Le nouveau noir varie de 0 à ∞.

Il semble pourtant que la première expression correspond mieux à l'idée de petits écrans opaques développés dans la couche sensible. L'aire occupée par ces écrans est d'abord une fraction nulle de l'aire totale; pour les plus grands noirs, elle devient égale à cette aire.

La comparaison entre un objet lumineux et un négatif est également arbitraire. Mais on supprime l'arbitraire en posant que la reproduction négative est correcte si, *par une nouvelle inversion effectuée suivant les mêmes lois*, elle donne un positif correct. Or la comparaison du positif et de l'objet n'est plus arbitraire : la correction du résultat exige que les quantités de lumière émises par les régions correspondantes soient proportionnelles.

2° — En raison de la forme de la courbe des noirs, le négatif est évidemment incorrect. Au-dessus d'une certaine intensité, ce cliché devient *pratiquement* opaque; au-dessous d'une autre intensité, il ne vient rien. Donc indépendamment de toute comparaison numérique, le positif résultant d'une double inversion ne peut être conforme à l'objet.

Encore ici supposons nous l'objet monochromatique : l'infidélité devient trahison pour des objets colorés.

3° — Cherchons ce qui arrive en supposant que la courbe des noirs, *tels que nous les avons définies* est une droite passant par l'origine.

Écrivons qu'il y a proportionnalité entre les noirs et les éclairements pendant l'exposition :

$$N = 1 - \frac{I}{I_0} = kE.$$

Faisons un diapositif par contact. La quantité de lumière qui passe, à travers le négatif, est proportionnelle aux espaces laissés vides, c'est-à-dire à $1 - N$. En vertu de notre hypothèse sur la courbe des noirs les noirs du positif sont :

$$n = 1 - \frac{i}{i_0} = k'(1 - N) = k'(1 - kE).$$

Pour qu'il y ait reproduction exacte, il faudrait que i et E fussent proportionnels.

Or on a : $$i = i_0 k'k \,.\, E + i_0(1 - k').$$

Ainsi, même dans ce cas, la reproduction serait *généralement* incorrecte : les intensités transmises par le positif ne sont pas proportionnelles aux intensités émises par l'objet ; elles se contentent de varier proportionnellement. Bien entendu la conclusion ne vaut que pour des éclairements E ne couvrant pas complètement la couche sensible d'écrans opaques, puisque à ces éclairements correspond sur le positif des régions blanches.

Est-il possible de faire $k' = 1$, par suite de rendre correcte la reproduction? Suivant le temps de pose de la plaque devant servir de dia-

positif, le coefficient k' varie : il croît avec temps de pose, à partir de 0 pour un temps de pose nul.

Pour avoir une reproduction correcte, il faut prendre le temps de pose du futur diapositif tel que le noir soit juste égal à 1, c'est-à-dire que les écrans opaques couvrent juste la plaque, dans les régions pour lesquelles on avait $E = 0$.

Le coefficient k' prend alors la valeur 1; i et E sont proportionnels. Ainsi pour une courbe des noirs rectiligne et passant par l'origine, et au-dessous d'une certaine luminosité pour l'objet, il est possible d'avoir une reproduction correcte. La courbe réelle n'est pas une droite passant par l'origine; mais la portion AB quasi rectiligne est assez étendue et assez voisine de passer par l'origine pour que la reproduction réelle soit sinon correcte, du moins acceptable.

362. **Photométrie photographique.**

1° — Est-il possible de baser une méthode photométrique sur la photographie?

La réponse est négative et sans appel si l'on prétend déduire directement l'intensité lumineuse du faisceau éclairant (ou l'éclairement E du cliché, ce qui revient au même) d'une mesure du noir. La fonction $N = f(E)$ est trop complexe et trop variable d'une plaque à l'autre, pour que de la valeur numérique de N, on puisse déduire celle de E; au surplus les plaques ne sont pas homogènes (§ 358).

La réponse est affirmative si l'on veut seulement remplacer l'œil par la plaque photographique dans la détermination de l'égalité de deux éclairements de même composition (je ne dis pas de même teinte, car deux teintes identiques pour l'œil ne le sont pas nécessairement pour la plaque).

Malheureusement l'hétérogénéité de la plaque complique singulièrement la technique. Pour savoir si les noirs *seraient* égaux *pour la plaque homogène*, nous devons croiser les expériences sur la plaque réelle, c'est-à-dire appliquer la méthode du § 358.

2° — Soit, par exemple, à déterminer pour l'ultraviolet les coefficients d'absorption d'un liquide. Nous effectuons les clichés 1, 1', 1'', avec une couche d'épaisseur E et un faisceau d'intensité i; nous effectuons les clichés 2, 2', avec une couche d'épaisseur E' et un faisceau d'intensité i'. Nous faisons varier E' ou i' de manière que dans les deux cas les noirs soient les mêmes.

Représentons par $\exp(-\alpha\varepsilon)$ le coefficient par lequel nous devons multiplier l'intensité du faisceau incident pour obtenir l'intensité du faisceau transmis par la couche d'épaisseur ε, indépendamment des réflexions aux intersurfaces. Pour la couche d'épaisseur $\varepsilon' - \varepsilon$, le coefficient devient $\exp[-\alpha(\varepsilon' - \varepsilon)]$.

On a :

$$i' \exp[-\alpha(\varepsilon' - \varepsilon)] = i,$$

d'où α.

Pour faire varier l'épaisseur de la couche liquide, un cylindre de verre à bases plan parallèles, porté par une vis micrométrique, s'enfonce dans une cuve cylindrique pleine du liquide et dont le fond est une glace à faces parallèles. En réglant parallèlement entre elles les faces de cette glace et les bases du cylindre, on constitue une lame liquide plan parallèle dont la vis micrométrique permet de modifier l'épaisseur. Deux nicols, dont on fait varier l'angle des sections principales (§ 125), fournissent des faisceaux incidents dont les intensités relatives sont connues.

3° — La méthode photographique, plus précise que les méthodes photométriques ordinaires, a l'inconvénient d'être longue.

On raccourcit les tâtonnements au moyen d'une interpolation par parties proportionnelles. On s'arrange de manière que pour deux groupes d'expériences, le noir des clichés 1 soit respectivement plus petit et plus grand que le noir des clichés 2 : on calcule aisément la manœuvre à opérer pour que les noirs soient égaux.

Une expérience de vérification montre ce qu'il en est.

363. Courbe des noirs pour les grands éclairements.

1° — Employons un faisceau de grande intensité; par exemple exposons un cliché aux rayons solaires directs.

Portons en abscisses les temps de pose, en ordonnées les noirs.

Pour des poses très courtes (petites fractions de seconde) la courbe des noirs a la forme que représente la figure 251.

Mais après une seconde de pose, le noir a déjà cessé d'avoir sa valeur maxima très voisine de l'unité, mais en toute rigueur pas nécessairement égale à 1 ; la courbe des noirs redescend : *il y a inversion.*

Le noir ne diminue pas indéfiniment. Pour une pose de l'ordre de dix secondes on trouve un minimum; après quoi la courbe remonte d'abord assez vite, puis très lentement (fig. 252).

Ce phénomène est connu depuis longtemps.

Voyons ce qu'il en résulte si nous faisons poser, non plus une teinte plate, mais un objet très lumineux formé de deux régions dont les rapports des intensités ne diffère pas beaucoup de l'unité.

Figurons en pointillé la courbe des noirs de la région la moins lumineuse.

Pour des poses très courtes, nous obtenons un négatif : sur le cliché la région la plus éclairée de l'objet est plus noire que la moins éclairée.

Allongeons la pose, nous arrivons au niveau du maximum : la plaque est uniformément noire; c'est, si l'on veut, un premier état neutre N_1.

Allongeons la pose; nous obtenons un positif; à la région la plus éclairée correspond le noir le plus faible.

Puis vient un second état neutre N_2 où la plaque est uniformément claire, auquel succède une image négative qui diffère de la première par l'énorme pose nécessaire à la produire.

Enfin nous arrivons sur les asymptotes des deux courbes qui sont peu distantes l'une de l'autre et qui donnent lieu à un troisième état neutre N_3.

2° — Pour réaliser des expériences qualitatives sur l'inversion, on construit une espèce de chambre plate dont le couvercle se compose

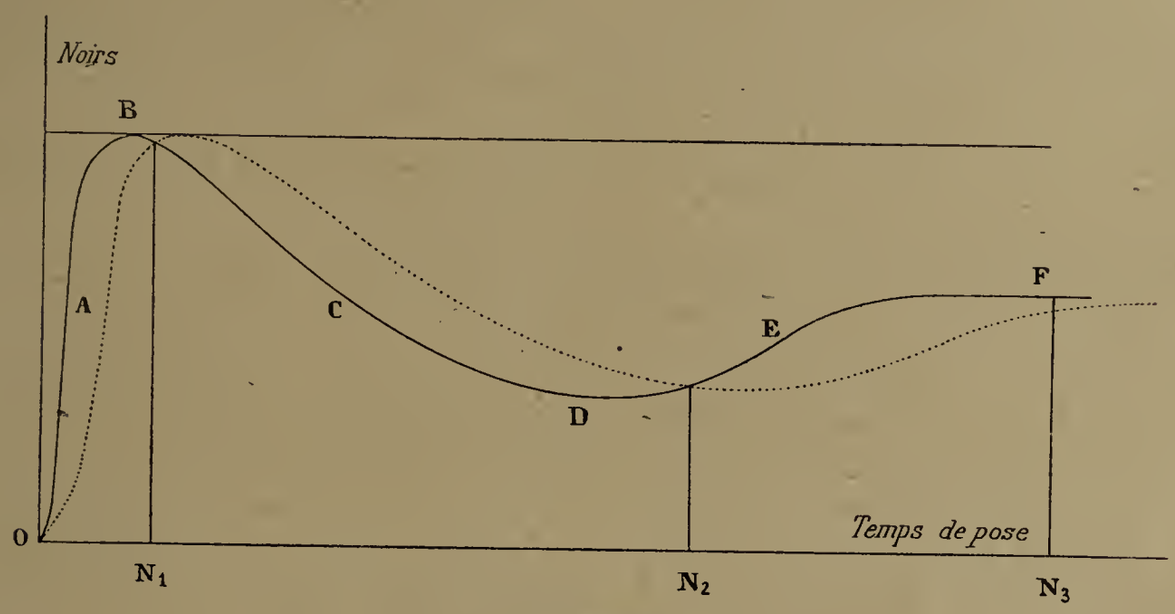


Fig. 252.

d'une douzaine de languettes parallèles mobiles à charnière et formant volets. On met une plaque dans la chambre; on soulève tous les volets, on expose brusquement à une forte lumière; toutes les secondes, par exemple, on rabat un des volets. On a ainsi côte à côte douze bandes parallèles dont les temps d'exposition ont varié suivant une loi arbitraire. On retrouve ainsi facilement la forme générale de la courbe des noirs.

364. **Inversion d'un cliché par surexposition.**

La courbe précédente permet de discuter la question si controversée de l'inversion du cliché par surexposition.

Il est d'abord évident que si l'on ne prend pas des précautions particulières, le cliché ne sera pas inverti dans toutes ses demi-teintes. Pour les régions peu lumineuses, nous serons encore à gauche de l'ordonnée N_1, sur la courbe montante OAB, alors que pour la même pose et pour les régions très lumineuses, nous aurons dépassé cette ordonnée : nous serons sur la courbe descendante BCD.

Le problème est simplifié si, par une exposition d'ensemble préalable, de durée suffisante, nous commençons par mettre *tous les points* de la plaque sur la courbe descendante BC.

Sur les parties qui seront alors insolées, le noir *diminuera* et d'autant plus que l'intensité de la lumière sera plus grande. C'est effectivement ainsi que MM. Lumière conseillent d'employer leurs plaques *intensives* pour positifs directs. Il va de soi que la pose sera toujours longue

(de l'ordre de 5 à 10 minutes). Aussi bien le résultat n'a qu'une relation vague avec le positif obtenu par contact à partir d'un négatif ordinaire.

Toutes les discussions sur la méthode précédente sont sujettes aux mêmes critiques. L'œil est extrêmement complaisant, si complaisant même que dans certains cas il ignore si ce qu'on lui montre est un positif ou un négatif. Pour peu que le cliché ait une vague apparence de positif, il se déclare satisfait. Une discussion vraiment scientifique exige plus de rigueur. Ceux qui prétendent réaliser une inversion correcte par surexposition, doivent publier les courbes des noirs de la plaque en fonction des temps de pose et pour diverses intensités.

Ils reconnaîtront alors que leurs soi-disant positifs ne le sont qu'en raison d'une tolérance excessive.

Si l'on ne commence pas par noircir uniformément la plaque, il n'y a aucun espoir d'obtenir une inversion régulière. Les régions peu lumineuses viennent quasiment en blanc : poser 5 ou 10 minutes devant un écran noir, ne donne jamais des noirs intenses sur le cliché.

Si la plaque est au préalable noircie, la théorie indique qu'il n'est pas impossible d'obtenir une inversion relativement satisfaisante. Toute la difficulté, et elle est grande, consiste à choisir ce noircissement préalable. On a tôt fait de dire qu'il faut voiler la plaque des deux côtés; malheureusement une telle recommandation est bien imprécise.

Le résultat dépend absolument de l'état d'où on part, état variable avec l'intensité du voile préliminaire

Au surplus pour intense que soit la lumière, on ne ramène pas le noir à être nul. Le noir minimum est un gris assez intense : le cliché manque toujours d'oppositions. Ce serait une erreur grossière de croire qu'une surexposition ramène la plaque dans l'état premier.

365. Inversion en fonction de la quantité d'énergie.

Représentons le noir en fonction de l'énergie déversée $Q = Et$.

Pour des quantités Q petites, nous savons que la courbe des noirs n'est pas unique. La courbe qui correspond au plus grand éclairement (par suite au temps de pose le plus court) est au-dessus de celle qui correspond au plus petit éclairement. L'expérience montre que pour de grandes valeurs de Q, les courbes conservent les mêmes situations relatives (fig. 253).

La figure demande un commentaire.

Assurément quand on noircit systématiquement un cliché, le noir s'approche de devenir égal à son maximum théorique qui est l'unité; mais il ne l'atteint jamais rigoureusement. La différence entre le maximum et l'unité (différence qu'exagère la figure) varie suivant la manière de noircir; l'abscisse du maximum décroît à mesure que l'éclairement diminue.

Quand les noirs sont très voisins de l'unité, il n'est pas précis de les mesurer directement. On se sert du cliché négatif pour obtenir par con-

tact un positif dont on compare les noirs; ce qui est permis, puisqu'il s'agit ici de vérifier simplement si, à égalité d'énergie, les noirs dépendant de l'intensité du faisceau lumineux qui sert à impressionner.

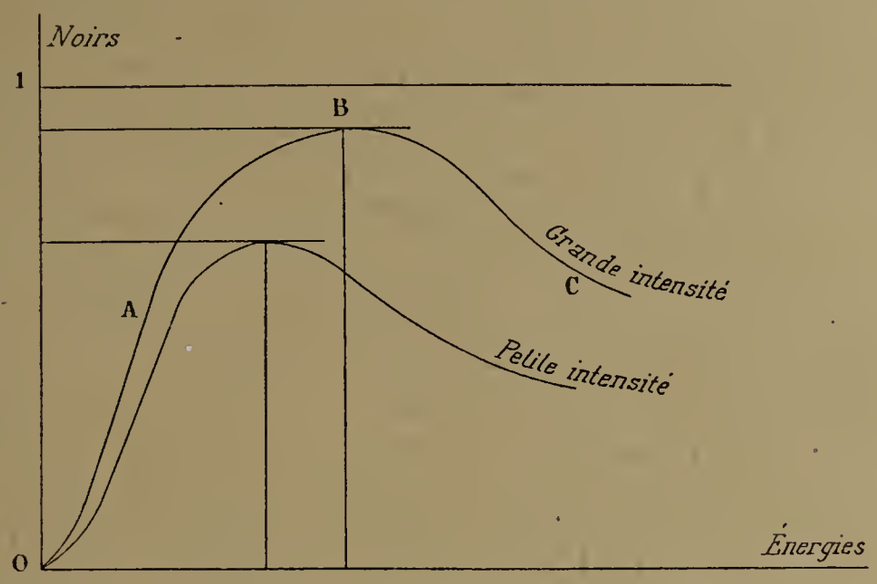


Fig. 253.

Pour modifier l'éclairement, j'appliquais la loi en raison inverse du carré de la distance.

J'ai toujours trouvé un noir d'autant plus faible que l'éclairement de la plaque est plus faible, à énergie déversée constante.

366. **Effet des alternatives d'intensités grandes et petites.**

1° — On déverse successivement sur le cliché deux certaines quantités d'énergies, l'une avec l'éclairement E_1, l'autre avec l'éclairement E_2 beaucoup plus petit.

On compare les résultats obtenus en commençant par E_1 ou par E_2.

On trouve que le noir est beaucoup plus grand dans le premier cas que dans le second. Un éclairement trop faible pour avoir une action sensible sur un cliché non impressionné ou peu impressionné, a donc une action sensible, s'il agit après un éclairement plus fort.

Becquerel classait les radiations en *actives* et *continuatrices*, celles-ci, de plus grandes longueurs d'onde, n'agissant que sur une matière déjà impressionnée. Une telle distinction s'effondre devant le fait (démontré par mes expériences) que toutes les radiations jouent le rôle réservé par Becquerel aux *continuatrices*. Les radiations rouges, ordinairement peu actives, n'ont d'effet que si elles agissent après d'autres radiations plus actives.

2° — Expériences sur les énergies capables de produire l'inversion.

Les expériences précédentes correspondent à la partie ascendante OAB de la courbe des noirs, c'est-à-dire à des énergies déversées moyennes. Étendons-les aux forts éclairements. La méthode consiste à faire poser un cercle de 3,5 centimètres de diamètre, puis à rabattre une

couronne opaque de manière à ne laisser découvert qu'un cercle de 2 centimètres de diamètre. Après développement, on juge immédiatement par contraste, s'il y a inversion dans le cercle central.

Déversons successivement la même quantité d'énergie avec des intensités 1 (opération P) et 6 (opération G), par conséquent avec des poses 6 et 1. Les combinaisons GG, PP, PG, ne donnent pas d'inversion; la combinaison GP donne l'inversion.

Ainsi alors qu'une pose avec l'intensité 6 se superposant à une pose égale, ne diminue pas le noir, une pose d'intensité 1 (et de durée 6, de manière que l'énergie déversée soit la même) le diminue, c'est-à-dire amène le point figuratif plus loin sur la courbe des noirs.

C'est une des formes de l'action continuatrice des faibles éclairements venant après les grands.

367. Action sur une plaque au gélatinobromure d'un faisceau lumineux interrompu.

1° — Exposons une plaque au gélatinobromure derrière une roue de zinc découpée comme l'indique la figure 254 et mue par un petit moteur électrique avec une vitesse uniforme facile à déterminer.

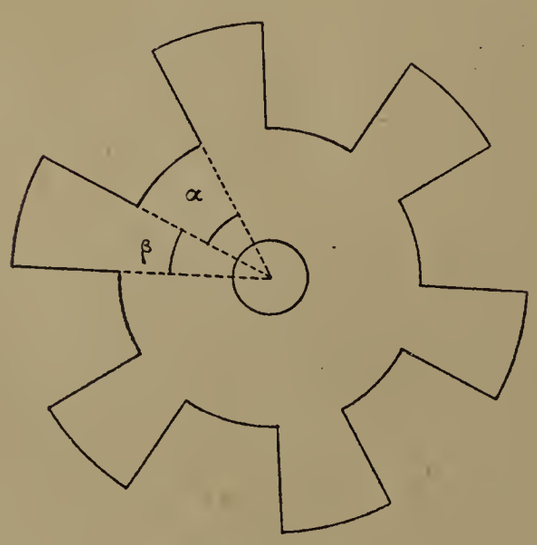


Fig. 254.

Pour que l'intensité lumineuse passe brusquement de la valeur nulle à la valeur maxima, disposons la roue près de la couche sensible et supposons la source lumineuse assez éloignée.

Pour une roue donnée, définie par le nombre des dents et par le rapport $\alpha : \beta$ des vides ou pleins, la quantité d'énergie déversée est indépendante du nombre n de tours par seconde; mais la répartition de l'énergie dans le temps dépend de ce nombre.

Posons : $$\mu = \alpha : (\alpha + \beta).$$

Choisissons une pose assez longue et faisons varier la fréquence d'une valeur très petite à une valeur très grande. Très petite signifie que le nombre des périodes (obscurité, lumière) contenues dans le temps de pose est de quelques unités; très grande signifie que le nombre de périodes par seconde se chiffre par centaines.

On trouve que le noir diminue quand la fréquence augmente; il diminue d'abord vite, puis lentement; de sorte que pour de grandes fréquences, le noir est indépendant de la fréquence (fig. 255).

Dans tous les cas la quantité totale d'énergie déversée est la même; le temps de pose effectif est le même : seul varie le nombre des inter-

ruptions. Leur fréquence diminue le noir proportionnellement à elle-même quand elle est petite, puis de moins en moins à mesure qu'elle grandit.

2° — Utilisons une roue caractérisée par un certain rapport voisin de 0,2. Nous venons de voir que pour des interruptions nombreuses, une pose 1 avec la roue donne un noir plus petit qu'une pose μ sans la roue, l'éclairement restant le même dans les deux cas. L'expérience montre que le noir avec la roue est même plus petit que celui qu'on

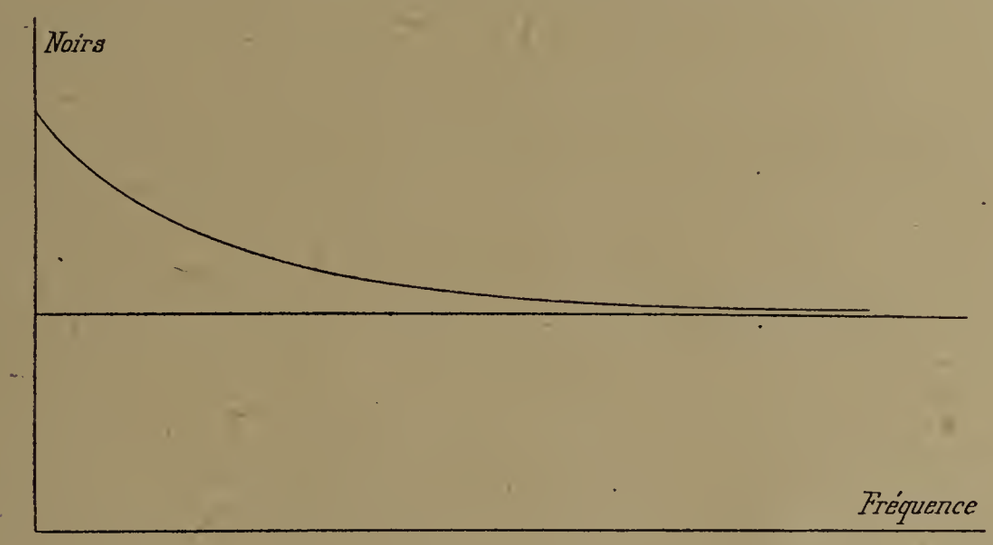


Fig. 255.

obtiendrait en posant le temps 1 avec un éclairement μ. Ainsi l'effet des interruptions sur le noir n'est pas équivalent à un étalement de l'éclairement total dans le temps, avec conservation de l'énergie. Pour des valeurs de μ de l'ordre de 0,2, l'effet des interruptions amène une diminution plus grande; pour des valeurs beaucoup plus petites, il se peut que l'effet soit interverti.

3° — Les interruptions produisent des effets analogues sur l'inversion. Pour la même quantité d'énergie déversée, les clichés sont toujours plus clairs avec la roue que sans la roue, absolument comme si l'on avait diminué l'éclairement en laissant constante l'énergie.

Corrélativement on trouve avec la roue des inversions pour des quantités d'énergie plus faibles. Bref les courbes sont disposées comme celles de la figure.

368. **Étude comparative des diverses couleurs.**

Le problème est le suivant : existe-t-il des différences spécifiques dans l'action des différentes radiations, ou tout se borne-t-il à une question de quantité? peut-on remplacer une certaine intensité violette par une autre rouge sans modifier les résultats?

Becquerel et avec lui la plupart des physiciens admettent l'existence de différences spécifiques. Je suis de l'opinion contraire.

Pour Becquerel les rayons se classent en *actifs* et en *continuateurs*; les rouges n'excitent pas, mais continuent l'action des violets.

Je choisis deux verres colorés, l'un violet foncé arrêtant le rouge, l'autre jaune clair transmettant le jaune et le vert, celui-ci très lumineux. Je les interpose devant la source; je place les plaques à des distances d_1 et d_2 telles que les actions ne soient pas très différentes. La recherche de cette condition préliminaire montre ceci : les plaques dont nous savons que les propriétés varient d'un bord à l'autre, ne sont pas identiques entre elles : le rapport de leurs sensibilités pour des radiations différentes varie de l'une à l'autre.

Peu importe du reste pour ce qui nous occupe.

Sur les cinq ou sept clichés d'une plaque, superposons deux poses l'une avec le violet à la distance d_1, l'autre avec le vert à la distance d_2. D'un cliché au suivant intervertissons l'ordre des poses.

Avec ces poses superposées, on trouve que le noir est plus grand quand on commence par le verre qui produit l'action la plus énergique. Ainsi le violet continue l'action du vert, le vert continue celle du violet : tout dépend des intensités relatives.

369. **Température photochimique. Agitation.**

1° — Les éléments sensibles d'une couche sont modifiés par la lumière *d'une manière qui semble permanente.* On sait que des plaques exposées, puis gardées des mois ou des années avant d'être développées, ne semblent rien avoir perdu de leurs qualités. Je dis *ne semblent*, parce que la démonstration correcte du fait est quasiment impossible. Quant à cette modification, que ce soit une transformation à l'état de sous-bromure, un commencement de dépôt d'argent, une allotropie, une absorption d'énergie,... du point où nous sommes placés, c'est parfaitement indifférent, pour la raison qu'en définitive c'est exactement la même chose, *aux mots près.*

Reste à savoir suivant quelle loi la modification dépend de la lumière. Les expériences précédentes montrent que la quantité dq transformée dans l'intervalle de temps de t à $t + dt$, dépend non seulement de l'éclairement actuel E, mais encore des éclairements antérieurs. Il est dès lors naturel d'imaginer une variable intermédiaire, analogue à une température *mutatis mutandis*, que nous appellerons *agitation* et désignerons par la lettre i.

Entre la masse transformée dans le temps dt et l'agitation, il nous sera loisible d'imaginer une relation bien déterminée de la forme :

$$dq = f(i, q) \,.\, dt.$$

2° — L'éclairement E et l'agitation i sont liés par une équation différentielle. Nous pouvons chercher la forme la plus simple compatible avec les expériences précédentes.

Cette manière de procéder me semble d'une clarté parfaite. Lorsque je proposai le travail que je résume, comme thèse à l'honorable M. Bouty, il pensa mourir de congestion. Il voulait à toute force savoir

si c'était un sous-bromure ou de l'argent métallique qui se formait. La discussion du phénomène dans l'ignorance de ce « renseignement », l'effarait au point... qu'il me rendit mon travail, en me conseillant de ne pas le publier de peur de me faire tort.

Je ne parlerais pas de ce grotesque, s'il n'avait, hélas! fait des petits.

Par exemple, pouvons-nous écrire :

$$\frac{di}{dt} = a\mathrm{E} - \gamma i, \qquad (1)$$

ce qui est l'hypothèse la plus simple? Elle consiste à poser que l'agitation croît à chaque instant proportionnellement à l'éclairement, mais, comme la température et en raison d'une sorte de refroidissement, diminue d'autant plus vite qu'elle est plus élevée.

C'est la loi de Newton transportée à l'agitation.

L'équation (1) explique que pour un éclairement constant, l'action chimique ne commence pas immédiatement. Elle est fonction de l'agitation qui, sous l'influence de l'éclairement, ne prend pas tout de suite une valeur suffisante pour amener la modification des éléments sensibles.

Supposons l'éclairement E périodique; on peut le mettre sous la forme :

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}_0[1 + \mathrm{A}\sin(\omega t + \alpha) + \mathrm{B}\sin(2\omega t + \beta) + \ldots].$$

Substituons dans (1) et intégrons. Il est facile de voir que, pour une période assez petite, l'agitation ne dépend pas de la période; de même que l'échauffement produit à distance par un corps dont la température varie périodiquement, ne dépend pas de ces variations, si elles sont rapides.

Mais en vertu de (1), on vérifiera que l'agitation reste la même que si l'éclairement était constant et avait sa valeur moyenne, ce que nous savons contradictoire avec les expériences du § 367.

Donc l'hypothèse (1) est insuffisante.

On peut compliquer l'équation (1) jusqu'à ce que les faits s'en déduisent. Il est facile de montrer que les expériences précédentes sont représentées si l'on pose :

$$\frac{di}{dt} = a\mathrm{E} - b\mathrm{E}^2 - \gamma i.$$

3° — Alors intervient un autre problème : combien faut-il de variables pour représenter la modification chimique?

Pour expliquer de quoi il s'agit, je pose ci-dessus qu'il existe seulement une variable q. Mais les phénomènes d'inversion montrent qu'il est nécessaire d'en introduire plusieurs : q_1, q_2,...

En effet si le phénomène dépendait en tout d'une variable, à chaque noir correspondrait un état bien déterminé de la plaque; tandis que

nous pouvons réaliser le même noir pour trois états différents de celle-ci.

J'entends les élèves du prodigieux M. Lemoine et de l'étonnant M. Bouty réclamer que je leur donne le nom des variables q_1, q_2,... Essayons de leur expliquer pourquoi cela n'a pas d'intérêt.

J'opère sur la plaque au gélatinobromure : les variables s'appellent de certains noms. Je change de plaque, elles changent de noms. Tandis que les lois générales se retrouvent pour toutes les plaques, les noms changent.

Alors quel intérêt de les collectionner?

Les chimistes passent leur vie à cela : leur idéal est de réaliser tous les corps d'une série.

Chacun son plaisir. Mais le rôle du physicien est tout autre.

370. **Sensitomètre. Photomètres à papier.**

1° — Le lecteur est maintenant à même de comprendre l'incorrection foncière de la très grande majorité des photomètres basés sur les actions photochimiques.

Les seuls qui puissent avoir quelque valeur scientifique se bornent à dire si deux intensités sont égales; ils appliquent des variantes de la méthode du § 361. On peut évidemment remplacer la pile thermo-électrique par un des photomètres décrits au § 114; mais on fait intervenir les propriétés de l'œil : la précision est moindre. Quant à déterminer directement l'intensité lumineuse par la valeur du noir obtenu après un temps de pose connu, c'est une entreprise chimérique dans l'état actuel de la fabrication des plaques sensibles.

Dans mon *Cours d'Astronomie*, je parlerai de la photométrie stellaire et des efforts tentés pour y employer les plaques photographiques, efforts vains autant qu'on peut en juger par la discordance des résultats.

Je dirai seulement quelques mots des *sensitomètres* et *photomètres à papier*, parce qu'ils sont encore très employés et fixeront les idées du lecteur.

2° — Sensitomètre.

Voici le principe de la méthode.

Disposons contre une plaque photographique un coin prismatique de verre fumé, de couleur neutre, d'angle petit; son pouvoir absorbant croît de l'arête à la base. Eclairons avec une bougie placée à un mètre ou une lampe carcel placée à quelques mètres : nous réalisons sur la face d'incidence du prisme un éclairement connu en valeur absolue, et à l'émergence du prisme des éclairements E qu'on peut supposer également connus, si la lame est étalonnée.

Posons un temps connu t; développons. Déterminons jusqu'à quelle distance de l'arête le noircissement de la plaque est appréciable.

Pour augmenter la facilité de cette constatation, supposons la face

d'émergence du prisme quadrillée de traits opaques; déterminons jusqu'où le quadrillage devient visible sur la plaque insolée et développée. Il est clair que nous pouvons classer les plaques d'après le résultat obtenu : reste à savoir si cette classification correspond à quoi que ce soit d'absolu.

Dans notre expérience, nous disposons de deux variables : l'éclairement E, le temps de pose t. Si le noircissement ne dépendait que du produit Et, si de plus il était la même fonction de ce produit pour toutes les plaques, la méthode aurait un sens. Elle n'en a pas, parce que le noircissement est une fonction de E et de t, fonction qui varie d'une plaque à l'autre; de sorte qu'en modifiant soit l'éclairement, soit le temps de pose, nous faisons généralement varier l'ordre dans lequel se rangent les sensibilités des plaques.

En Astronomie nous retrouverons cette méthode du coin employée pour la détermination des grandeurs des étoiles. On détermine à partir de quelle épaisseur l'étoile devient invisible. Nous verrons comment la méthode est perfectionnée.

3° — Photomètres a papier.

Le photomètre à papier répond à de moindres ambitions; nous l'avons utilisé au § 318. Il s'agit simplement de déterminer quelle est *approximativement* la valeur actinique *actuelle* de la lumière qui sert à obtenir une épreuve au charbon, par exemple. On utilise cette lumière pour noircir du papier sensible dont on compare le noir à des noirs types, imprimés sur une bande de papier. A la condition de se servir toujours du même papier pour le photomètre, on peut évidemment tirer de précieux renseignements de la rapidité avec laquelle il noircit. On raccorde par l'expérience les effets sur le papier du photomètre et les effets sur le papier mixtionné. Il n'est plus question de mesures absolues; l'expérience est parfaitement raisonnable.

Le lecteur m'en voudrait de lui décrire les photomètres à papier qu'on trouve dans le commerce; il en construira lui-même d'aussi bons.

CHAPITRE VIII

REPRODUCTION ET IMPRESSION EN CREUX

Dans les chapitres suivants je passe en revue les procédés de reproduction photographique. Pour que le lecteur y comprenne le rôle de la photographie, j'expose d'abord les procédés d'impression fondamentaux. Je ne suis certes pas un professionnel de l'impression ; mais élevé pour ainsi dire au milieu des presses (depuis plus de cent ans ma famille imprime et édite), dans mon enfance ayant entendu chaque jour parler de grainage et de report, vu graver, tiré moi-même des épreuves en taille-douce, héliogravé,.... j'espère ne dire que des choses ayant le sens commun.

Aujourd'hui nul ne peut ignorer comment se fait un livre ou un journal. Peu importe que mon lecteur sache ce qu'est une maculature ou une morasse; il suffit qu'il ait une vision claire des principes.

J'entends : vous voulez donc qu'il sache tout? Que nenni! Mais s'il connaît les principes, son éducation se complétera malgré lui, par les rencontres de chaque jour; il prendra plus d'intérêt à ce qu'il voit,...; tandis que la connaissance du principe de la conservation de l'énergie, par exemple, n'élucide rien des phénomènes au milieu desquels il vit.

Qu'on médite sur la différence!

371. **Remarques générales sur l'impression.**

Imprimer c'est, par un procédé quelconque, mettre du noir ou de la couleur sur du blanc en général, ou sur une teinte plate quelconque. L'impression ne connaît pas, ne veut pas connaître les demi-teintes : le noir est noir, les couleurs sont ce quelles sont, sans dégradés d'aucune espèce. Certes il n'est pas impossible de laisser sur une planche en taille-douce une couche de noir d'épaisseur variable; mais c'est là un travail d'artiste et non d'ouvrier, travail exceptionnel du reste.

Que l'impression soit en taille-douce, en typo ou en litho, on n'obtient donc les dégradés que par l'espacement plus ou moins grand de traits plus ou moins larges ou de points plus ou moins gros : remarque essentielle pour bien comprendre tout ce qui suit.

Il en est très différemment dans le fusain, l'aquarelle, la peinture à

GRAVURE AU BURIN REPRODUITE PAR LE PROCÉDÉ DU § 397 (*gillotage*).

THE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF ILLINOIS

l'huile,... où les dégradés existent comme tels : vous pouvez laver un dessin à l'encre de Chine de manière à passer continûment d'un blanc pur à un noir parfait.

Il en est aussi différemment de la photographie, au moins en apparence dans quelques cas. Si l'on regarde un cliché à l'œil nu, les dégradés existent; mais le microscope montre des points opaques plus ou moins espacés : l'apparence de continuité disparaît.

372. **Gravure au burin et à la pointe sèche.**

1° — Le *burin* du graveur est une tige d'acier de section carrée ou losange, dont le côté a quelques millimètres de longueur. Contre une pierre dure huilée, on affûte une troncature symétrique sur un des angles : pour une longueur donnée du côté, on obtient une pointe d'autant plus aiguë que la troncature est plus inclinée (fig. 256). La *soie* du burin est tenue dans un manche en forme de *demi-champignon*, de manière à ne pas gêner quand on veut amener l'outil au quasi-parallélisme avec la planche à graver.

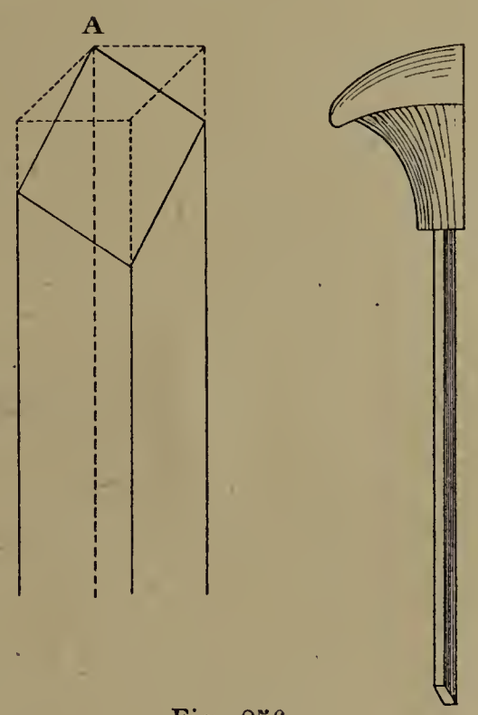


Fig. 256.

Le graveur arme son œil d'une loupe qu'il tient comme un monocle.

En appuyant la pointe sur une plaque de métal relativement mou (du cuivre rouge généralement) et poussant en avant, il creuse une *taille*. C'est un sillon de section droite triangulaire d'autant plus profond que le graveur lève davantage le poignet, d'autant plus superficiel qu'il tient l'outil plus horizontal. Il enlève ainsi un copeau. La planche est posée sur un coussin de cuir; pour obtenir les tailles courbes, le graveur la fait tourner de la main gauche.

On abat les *barbes* avec un grattoir; on creuse les tailles avec des burins aigus (*rentrées*).

Les tailles droites ou courbes sont diversement entre-croisées suivant la nature de l'objet à représenter. On ajoute des points pour les demi-teintes. La figure hors texte ci-contre donne la reproduction en gravure au burin pur.

Le *métier* consiste à choisir la forme des *tailles*, les angles sous lesquels elles s'entre-croisent, leur largeur et leur espacement. Ainsi les tailles à angle droit donnent un effet dur; les tailles en losanges sont d'une apparence plus agréable. On se sert aussi de *points* pour établir une transition entre les lumières et les ombres. Certains artistes ont

produit des gravures au burin entièrement en pointillé; l'effet n'en est guère heureux.

2° — Préparation de la planche.

La planche sur laquelle travaille l'artiste est généralement une plaque de cuivre de 2 à 4 millimètres d'épaisseur, battue à froid puis *planée*. Les bords sont taillés en biseau pour faciliter le passage sous la presse. On ne travaille pas tout de suite au burin sur la planche nue. On dessine d'abord très légèrement avec une pointe, ou bien on calque sur la planche recouverte de vernis; on repasse à la pointe pour découvrir le métal.

C'est alors seulement que commence le travail au burin.

A mesure qu'il avance, l'artiste fait des *épreuves d'état* pour juger de l'effet produit. Les épreuves tirées *avant la lettre* (la gravure finie et avant qu'on n'ait mis le titre et les indications d'usage) ont une valeur plus grande censément parce que la planche est supposée neuve, par conséquent non usée. Du reste la plus-value est éminemment conventionnelle, nous allons voir pourquoi.

3° — Galvanos.

L'essuyage après l'encrage et la pression considérable du cylindre de la presse usent et laminent le cuivre en bouchant peu à peu les tailles. Après quelques milliers d'exemplaires (plus ou moins suivant la profondeur du travail), les finesses ont disparu; seules les tailles les plus creuses restent apparentes; l'épreuve prend un aspect dur, *dépouillé*.

Pour s'assurer la possibilité d'un grand tirage et ménager la planche originale, on en fait, avant tout tirage, une reproduction ou *cliché* qui, dans le cas particulier, est communément appelé *galvano* (voir mon Cours de *Magnétisme et d'Électricité*, III, § 237).

Ainsi le tirage s'effectue le plus souvent, non sur la planche originale qui demeure intacte, mais sur le *galvano*. Quand un premier galvano est usé, on en fait un second, et ainsi de suite, autant qu'il est nécessaire.

Toutefois les tirages artistiques et de luxe, à nombre limité, se font généralement sur la planche originale qui donne toujours, surtout quand elle n'a pas été *aciérée*, plus d'effet et de finesse que le galvano.

Aciérer une planche de cuivre, c'est lui donner plus de résistance au tirage en le couvrant d'une mince couche de fer, de grain fin et très solide, à l'aide d'un bain de chlorure de fer dissous dans l'ammoniaque.

4° — Pointe sèche. Roulette.

La gravure à *la pointe sèche* ne diffère de la gravure au burin que par la forme de l'outil qui est plus petit et avec lequel on obtient des tailles peu profondes et des effets très doux.

Rares sont les gravures au burin qui ne sont pas complétées par la pointe sèche; les aquafortistes (§ 376) s'en servent pour certains travaux délicats qu'ils n'osent confier à l'acide. Quelques artistes l'emploient exclusivement.

La *roulette* est une sorte de molette d'éperon avec laquelle on obtient un pointillé.

5° — Effaçage.

L'effaçage se fait de diverses manières.

On peut frotter la surface avec une sorte de tige conique recourbée appelée *brunissoir*. Le brunissoir étale le cuivre et rétrécit plus ou moins la taille. Il n'enlève pas le métal, mais se borne à changer sa distribution.

On peut encore user le métal, soit en le frottant avec du charbon de saule imprégné d'eau, soit en se servant d'un grattoir.

Si l'usure a été assez profonde, il faut *repousser* le cuivre en frappant la planche à l'envers avec un marteau.

373. Encre d'imprimerie.

1° — Les huiles se classent suivant la nature de leur modification à l'air. Les unes (de lin, de noix, de chènevis,...) produisent une gelée. En couche mince, elles forment le *vernis* de la peinture à l'huile : on les appelle *siccatives*. Les autres (d'olive, d'amande, de colza,...), tout en absorbant de l'oxygène, ne perdent pas leur caractère de matière *grasse*; en particulier elles ne cessent pas de tacher le papier.

On augmente la siccativité en cuisant les huiles, surtout en les additionnant d'oxydes de plomb, de manganèse, de zinc. Certaines substances, comme la céruse, retardent la dessiccation : elles sont appelées *antisiccatives*.

2° — Encre d'imprimerie.

C'est un mélange de *vernis* (huile siccative, cuite pour augmenter la siccativité) et de noir de fumée. L'encre d'imprimerie est généralement à base d'huile de lin. On la traite par quelques centièmes d'acide sulfurique, on la lave, on la fait bouillir dans des chaudières de fonte jusqu'à ce qu'elle commence à se décomposer. Elle dégage des vapeurs qu'on enflamme. Pour éteindre on ferme avec un couvercle. L'opération épaissit l'huile, la rend siccative et l'empêche de tacher le papier.

On mélange avec de la suie obtenue par combustion des goudrons, ou avec du charbon réduit en poudre fine. On ajoute de la poix ou de la colophane pour augmenter la viscosité. On malaxe à chaud.

Les encres diffèrent par les proportions des matières employées et leurs qualités.

Le lecteur ne confondra pas l'*encre d'imprimerie* et l'*encre grasse* (§ 403).

374. Encrage et tirage.

1° — Encrage.

L'encrage *au tampon* se fait avec une espèce de bouteille à base hémisphérique, faite en chiffons tassés et enroulés. L'ouvrier la tient par le col. Il met un peu d'encre sur le marbre; il encre son tampon en

le faisant rouler sur sa base. Il répète ensuite l'opération sur la planche légèrement chauffée par un fourneau; il remplit ainsi les tailles. Le difficile est dans l'essuyage. Suivant que la planche est essuyée par un habile ou une mazette, le résultat diffère du tout au tout. Il faut en effet nettoyer la planche là où elle n'est pas entaillée; mais il ne faut pas vider les tailles. D'où le rôle d'une succession de chiffons (de mousseline en général) de plus en plus propres et de plus en plus doux.

Pour l'essuyage la planche est retirée d'au-dessus du fourneau; on jette dessus quelques gouttes d'eau potassée et on passe les chiffons.

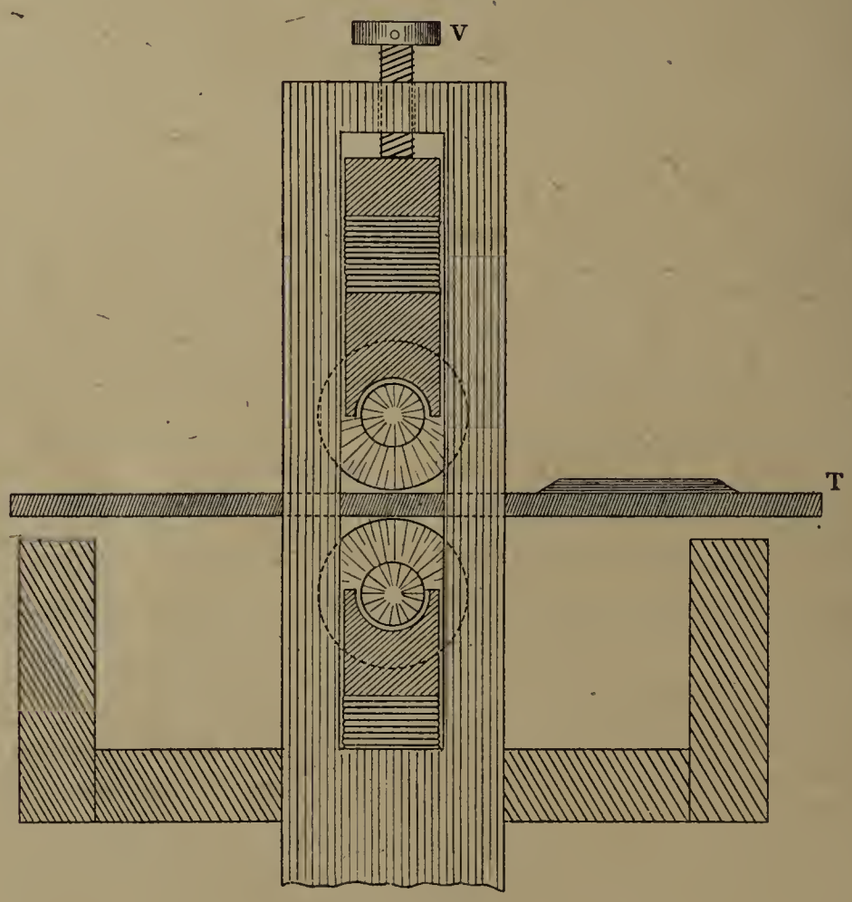


Fig. 257.

Jusqu'à ces derniers temps, on considérait l'encrage et l'essuyage d'une taille-douce comme impossible mécaniquement. On a récemment imaginé l'emploi de cylindres de cuivre gravés extérieurement par l'héliogravure (§ 381) qu'on encre et qu'on essuie avec des cylindres correspondants. Ce procédé a l'avantage de ne pas exiger l'impression sur papier *couché*. La difficulté du procédé est l'*habillage* du texte autour des illustrations. Il faut composer le texte, le photographier, bref le considérer lui-même comme une illustration. Le journal *le Miroir* est imprimé par ce procédé à un très grand nombre d'exemplaires.

L'encrage et l'essuyage *à la main* sont employées pour les épreuves artistiques. On procède avec de l'encre peu liquide. On applique l'encre avec le doigt, on l'étale avec le tampon. On nettoie le gros avec des chiffons; on continue l'essuyage avec la paume de la main séchée, en ayant soin de passer normalement aux tailles. Il faut beaucoup d'habi-

tude pour réussir, mais on tire d'une planche des effets extraordinaires. On dit que la planche est *garnie, engraissée,* quand intentionnellement certaines parties du travail ont été incomplètement essuyées par l'imprimeur; il y a *retroussage* quand l'encre déborde de la taille et épaissit le trait.

Les traits forts d'une épreuve en taille-douce présentent un relief qu'il est facile de reconnaître en passant dessus le doigt; on fait commodément l'expérience sur une carte de visite.

2° — Tirage.

Le *tirage* est généralement effectué *par laminage* avec une *presse à bras*. Elle est composée de deux rouleaux de fer ou d'acier, entre lesquels passe une table T en fer ou en acier : les rouleaux sont appuyés contre la table au moyen de cales en carton (parfois d'une vis V) par l'intermédiaire de demi-coussinets en bois ou en métal.

On applique sur la planche le papier *légèrement humide*; on superpose une feuille de papier servant de garde, puis des langes pour donner du foulage. On amène le biseau de la planche contre le cylindre supérieur qu'on fait tourner avec des bras (quatre, non représentés) fixés en croix. Telle est la presse en taille-douce, restée identique à elle-même, surtout dans sa forme, depuis des temps reculés.

Dans les presses en taille-douce de grand format, les cylindres sont actionnés à bras par une manivelle qui agit par l'intermédiaire d'un train d'engrenages; des embrayages convenables complètent l'installation.

La pression nécessaire est énorme; le papier garde toujours la trace des biseaux de la planche. Le papier, littéralement laminé, est allongé par l'opération.

375. Gravure à la manière noire.

Tous les procédés se ramènent à obtenir sur une planche métallique des combinaisons de sillons entre-croisés ou de trous dans lesquels l'encre est *bourrée* et qui la retiennent pendant l'essuyage.

Ils diffèrent par la manière d'obtenir les *creux*.

Voici d'abord le procédé qui diffère le plus de la gravure au burin.

La planche est régulièrement *grainée* par un ouvrier; c'est dire qu'elle est creusée uniformément et d'une manière systématique de creux régulièrement espacés et formant un *grain*. Encrée au tampon, elle donnerait au papier l'apparence d'un velours.

L'artiste use le grain pour obtenir les blancs.

La préparation se fait au *berceau*. C'est un outil d'acier, formant un arc de cercle (comme le couteau à hacher des cuisinières) et armé de dents fines; on peut le comparer à un peigne courbe à dents courtes. On le balance sur la planche suivant quatre directions à 45° les unes des autres, de manière à obtenir un *grain* régulier. C'est de l'égalité et de la finesse des hachures que les noirs tirent leur force et leur moelleux. Au reste l'opération est exécutable mécaniquement.

Le travail consiste alors avec un *racloir* et un brunissoir à user le grain de manière à ne laisser intacts que les noirs les plus intenses. En supprimant complètement le grain, ce qui revient à repolir la planche, on obtient les lumières vives. On conçoit la possibilité de réaliser les teintes intermédiaires.

La manière noire est surtout employée pour les effets de nuit, les clairs-obscurs. On lui reproche de manquer de fermeté. Elle convient au portrait et à la reproduction des tableaux genre Rembrandt.

376. **Gravure à l'eau-forte.**

Les procédés suivants utilisent la morsure chimique. Ils diffèrent par le moyen d'*obtenir la réserve*, de protéger certaines parties de la planche contre les mordants.

Dans la *gravure à l'eau-forte*, la *réserve* est un vernis généralement formé de cire, de bitume de Judée (2 parties de chaque) et de résine (1 partie). Pour recouvrir la plaque, on la prend par un coin dans un étau à main, on la chauffe; on frotte une boule de vernis; on étale le liquide produit avec un petit tampon de coton. Quand elle est encore chaude, on noircit la couche à la flamme d'une bougie.

Pour obtenir des grains irréguliers (*en manière de crayon*), on utilise des *roulettes* et des *mattoirs*, sortes de poinçons dont la base est garnie de dents.

Dessiner consiste ici à gratter le vernis et à découvrir le métal. On se sert de pointes fines emmanchées. Le dessin obtenu, on attaque avec une solution faible d'acide azotique dans l'eau (*eau-forte*). On commence par *border* la planche, par la transformer en un bac de faible hauteur au moyen d'un rebord de cire à modeler. On remplit ce bac d'eau-forte jusqu'à la hauteur d'un centimètre environ. Quand on juge la morsure assez profonde, on verse l'eau-forte et on lave à l'eau ordinaire. On procède ordinairement en plusieurs fois; on attaque à nouveau après avoir couvert d'un vernis les parties qu'on juge assez profondes.

Le noir diffère suivant la grosseur des traits et leur espacement; il est important que la morsure ne les élargisse pas en rongeant les parties latérales. La morsure achevée, on dissout le vernis ou on l'use en frottant avec un morceau de charbon mouillé.

Très souvent on combine l'eau-forte et le burin : on travaille au burin *un état d'eau-forte*, c'est-à dire une eau-forte qui, comme telle, serait inachevée.

377. **Gravure à l'aquatinte (lavis).**

La planche est vernie et le dessin gravé légèrement à l'eau-forte; puis la planche est dévernie. Il s'agit de la recouvrir d'une réserve *en grains*, le noir ne pouvant tenir que sur des creux de petites dimensions et les larges teintes plates noires étant impossibles en raison de l'essuyage qui emporterait tout.

GRAVURE A L'EAU-FORTE REPRODUITE PAR LE PROCÉDÉ DU § 397 (*gillotage*).

THE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF ILLINOIS

La réserve est formée de grains de résine. Une caisse en bois est divisée en deux par une cloison horizontale C. On commence par la tirer comme un tiroir. On dépose sur le fond de la boîte de la résine en poudre qu'on agite violemment avec un soufflet extérieur communiquant avec l'intérieur par un tube de caoutchouc. La résine forme un

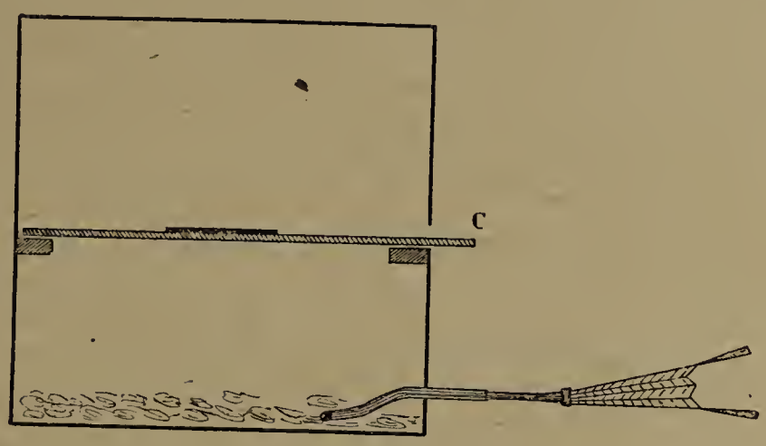


Fig. 258.

nuage. Les gros grains se déposent les premiers. Au bout de deux minutes, ne restent en suspension dans l'air que les grains très fins. On pousse alors la cloison horizontale sur laquelle on a placé la planche. Après deux ou trois minutes, elle est couverte d'une fine poussière très régulière. Si l'on tarde à introduire la plaque, le grain est trop fin et s'agglutine à la cuisson (voir plus loin); si l'on attend insuffisamment, il est trop gros. C'est l'habitude qui indique le temps convenable.

La plaque retirée, il faut *cuire le grain*, le chauffer jusqu'à ce qu'il se soude au cuivre, sans couler. Sitôt que la plaque change d'aspect, on la refroidit sur une table en fer. La plaque est *grainée*, l'acide mordra *entre* les grains.

On protège les blancs avec du vernis, puis on fait mordre : d'où une teinte grise légère. On lave; on protège avec du vernis les parties assez foncées, puis on fait mordre; et ainsi de suite. On répète jusqu'à obtenir les noirs les plus intenses.

L'application du mordant (solution aqueuse d'acide nitrique, de perchlorure de fer, d'acide chlorhydrique...) se fait au pinceau; d'où le nom de *lavis* donné au procédé.

L'inconvénient du procédé est l'emploi de la boîte à résine qui est encombrante. On réalise aussi le grain avec une solution de résine dans l'alcool ou dans l'éther dont on recouvre la planche et qu'on fait évaporer à une douce chaleur.

378. **Autres procédés.**

1° — La méthode générale consiste donc à créer un *grain* quasi régulier en une matière non attaquée par l'acide et à graduer la morsure. Le nombre des procédés est considérable. Par exemple on recouvre

la planche d'un vernis, on la chauffe, on saupoudre de sel marin finement pulvérisé. On laisse refroidir, on dissout le sel dans l'eau. Il ne reste plus qu'à mordre suivant les noirs qu'on veut obtenir; en raison de la finesse des grains de sel, la morsure porte sur des régions assez restreintes pour que l'encre *bourrée* y soit à l'abri du chiffon.

2° — On couvre la planche d'un vernis qui contient de l'axonge. On étend dessus du papier mince, un peu plus grand que la planche, *grainé* (qui possède une rugosité systématique) et légèrement humecté. Pour qu'il soit bien fixe, on retourne ses bords et on les colle au dos de la planche; on attend qu'il sèche. Puis, en se gardant de le toucher autrement que par le crayon, on dessine sur le papier. Le dessin achevé, on coupe le papier sur sa marge; on le soulève avec précaution : il emporte le vernis en produisant un pointillé partout où le crayon a passé laissant le cuivre à nu. On continue comme pour l'eau-forte.

379. **Taille-douce en couleur.**

Une première méthode consiste à peindre la planche avec un petit tampon d'encrage appelé *poupée*. Il y a autant de tampons que de tons; on tire toutes les couleurs à la fois. Mais les épreuves sont chères et inégales. Le procédé n'est employé que pour les tirages de grand luxe et pour un dessin ou un ornement très simple. Il fournit du reste des épreuves d'un charmant coloris.

Le procédé industriel consiste à obtenir trois ou quatre planches distinctes, chacune tirée en une couleur. Le rouge, le jaune, le bleu et le noir (parfois absent) se combinent par juxtaposition et superposition. La difficulté réside dans le *repérage* du papier successivement sur chaque planche. Le repérage est toujours incertain en taille-douce, parce qu'il est nécessaire que le papier soit mouillé et fortement pressé contre la planche.

Rien n'empêche de multiplier les planches.

380. **Musique.**

La musique est gravée sur des planches d'étain de 2 à 3 mm. d'épaisseur, planées et polies. L'ouvrier fait d'abord son plan et détermine le nombre de lignes et le nombre des mesures qu'il veut mettre par ligne. Il grave les *portées* avec une sorte de couteau à cinq lames. La plupart des signes musicaux sont obtenus au moyen de poinçons gravés, enfoncés à coups de marteau dans la planche posée sur une plaque dure. Seules les queues des notes, les pauses,... se gravent après coup avec un espèce de burin appelé *échoppe*.

Pour corriger les erreurs commises, on est obligé de *repousser* le métal par derrière, ce qui bouche le trou; d'où la nécessité de déterminer au dos avec un compas à branches courbes la place qu'occupe la fausse note.

Anciennement le travail se faisait sur cuivre.

On emploie parfois le zinc.

Bien que la musique soit gravée en creux, on ne la tire pas sur les presses en taille-douce. On effectue un report sur pierre (§ 406) et on tire avec des presses lithographiques.

On compose et on imprime aussi la musique typographiquement, c'est-à-dire avec des caractères mobiles; chacun d'eux constitue une fraction de portée avec les notes. La *casse* de musique est extrêmement compliquée, aussi le procédé typographique n'est-il guère employé.

Photogravure en creux.

Nous allons passer en revue les divers procédés photographiques qui permettent d'obtenir automatiquement la *réserve*, c'est-à-dire de recouvrir certaines parties de la plaque à graver (métallique ou vitreuse) d'une substance qui la protège contre l'action des mordants.

381. **Procédé au bitume de Judée (héliogravure de Nicéphore Niepce).**

1° — La méthode est basée sur la modification par la lumière du *bitume de Judée*, substance qu'on trouve dans le sol au voisinage de la mer Morte. Les autres bitumes (de la Trinité, du Pérou) sont moins sensibles.

Le bitume de Judée est noir, à cassure brillante, très friable. Il est soluble dans l'essence de térébenthine, la benzine, le chloroforme. *Exposé en couche mince à la lumière, il devient insoluble dans l'essence de térébenthine* : cette propriété est la cause de son emploi. Sur la gélatine et l'albumine bichromatées, il a l'avantage de résister aux acides : mais il a le désavantage d'être beaucoup moins sensible à la lumière. Ces deux faits expliquent une série de procédés que nous verrons.

En particulier, il est impossible d'utiliser des couches épaisses de bitume sans rendre excessive la durée d'exposition.

Par dissolution fractionnée on sépare du bitume une portion plus sensible à la lumière; mais les résultats n'ont pas grand intérêt pratique. Le bitume vulcanisé est également plus sensible.

Pour protéger les métaux, on utilise souvent comme vernis la solution de bitume dans la benzine ou l'essence de térébenthine.

2° — Héliogravure au trait.

Au bain-marie à 50°, on dissout 5 grammes de bitume dans 100 centimètres cubes de benzine; on filtre. On ajoute 3 grammes d'essence de citron. Le mélange se conserve dans un flacon rouge bien bouché.

Pour s'en servir, on l'étend comme du collodion sur la plaque de zinc, de cuivre ou du corps quelconque qu'il s'agit de graver.

On fait sécher dans l'obscurité.

On insole sous un dessin à l'encre de Chine ou sous un cliché positif, au trait. Partout où passe la lumière, le bitume devient insoluble *dans*

l'essence de térébenthine; là où elle ne passe pas, le bitume reste soluble.

Après une exposition suffisante (de l'ordre d'une heure), on plonge la plaque dans l'essence, on agite : le métal est mis à nu dans les parties qui étaient protégées par le dessin. Il ne reste plus qu'à faire agir sur les parties dégarnies un mordant quelconque.

On obtient ainsi l'équivalent d'une planche gravée qu'on tire en taille-douce. C'est, en définitive, le procédé de l'eau-forte où la lumière se charge d'enlever par endroits la couche protectrice de vernis.

Au lieu d'utiliser un acide, on peut employer la galvanoplastie, *en prenant la plaque pour anode* et comme bain une solution de sulfate de cuivre : le cuivre est attaqué et la plaque creusée.

382. Décoration photographique de substances diverses (Héliographie).

La méthode précédente se prête à d'innombrables applications.

1° — Décoration de surfaces métalliques.

Supposons la plaque recouverte d'une couche de bitume, insolée et développée à l'essence de térébenthine. Il s'agit de conserver le dessin.

Si la plaque est en cuivre, on peut passer dessus un tampon de coton imbibé d'un sel de platine : il attaque le cuivre mis à nu sous les traits du dessin et le noircit. On dissout dans la benzine le bitume (insoluble dans l'essence) qui servait de réserve; le dessin apparaît en noir sur fond rouge de cuivre.

Si la plaque est en argent, on peut l'exposer aux vapeurs d'iode. Après dissolution du bitume, le dessin apparaît en noir sur fond blanc d'argent; l'iodure *blanc* est en effet attaqué par la lumière et vire au noir.

2° — Emploi des couleurs d'aniline.

L'ivoire, la nacre, le celluloïd fixent énergiquement les couleurs d'aniline en solution aqueuse ou alcoolique, à froid ou à une température peu élevée. On utilise par exemple l'éosine, la fuchsine (rouge), la safranine (jaune), la cyanine, les bleus B (bleu), le violet de méthylaniline.

Ceci posé, recouvrons la plaque à décorer d'une couche de bitume; insolons; développons à l'essence de térébenthine. Lavons, séchons. Il ne reste plus qu'à passer avec un pinceau la couleur d'aniline sur les parties découvertes, à laisser sécher et dissoudre dans la benzine le fond de bitume.

383. Emploi de la tournette.

Le *couchage* de solutions quelconques liquides se fait comme pour le collodion. Dans l'industrie on égalise la couche par un procédé général dont il faut dire quelques mots. La plaque est disposée horizontalement sur une *tournette*, appareil auquel on imprime autour d'un axe vertical un mouvement de rotation d'abord lent, puis de plus en plus

rapide. La force centrifuge élimine l'excès de liquide tout en égalisant la couche.

La figure représente une tournette. La glace G est prise entre deux

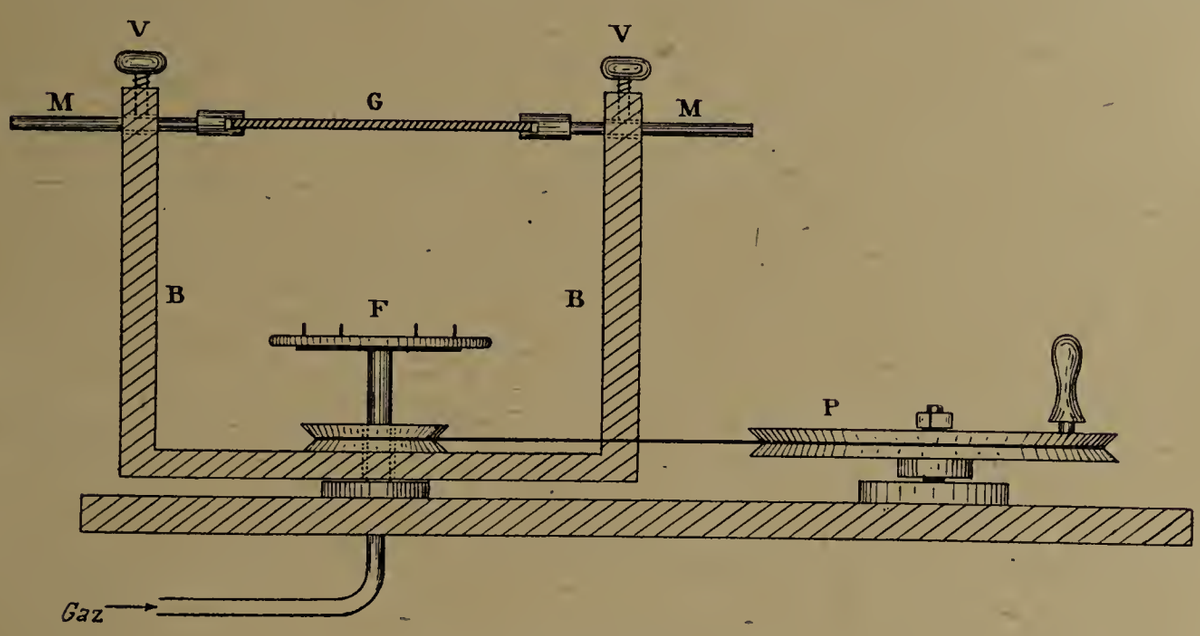


Fig. 259.

pièces MM qu'on peut écarter plus ou moins et fixer avec les vis V. La poulie P imprime un mouvement de rotation au bâti BB. Un fourneau F permet de combiner le séchage et l'étendage.

384. Chromozincographie en creux.

Sur le cas très simple de la gravure au trait creux, expliquons en quoi consiste l'obtention des couleurs.

On part d'un positif; on prépare au bitume autant de plaques de zinc qu'il y a de couleurs (y compris le noir), on les insole sous le positif unique, on les développe à la manière ordinaire. Pour rendre possible le *repérage*, on a tracé en haut et en bas du cliché, en dehors du dessin, deux repères formés de deux lignes en croix dont les intersections donnent deux points. Ces repères se produisent sur tous les zincs.

Chacun des zincs, correspondant à une couleur, ne doit porter qu'une partie du dessin. Avant de mordre, on recouvrira donc au pinceau, avec du vernis ou bitume, tout ce qui doit disparaître. C'est possible, le trait après développement se détachant en blanc gris sur le fond rouge du bitume.

Les planches sont alors gravées. On les encre avec les couleurs correspondantes. Le papier passe sous la presse autant de fois qu'il y a de planches, par suite de couleurs : la seule difficulté est un repérage parfait.

385. Gravure au trait sur verre (couche inerte et couche sensible).

1° — La gravure sur verre fournit une intéressante application des

propositions énoncées au § 381. Impossible de se servir de bitume de Judée : les couches minces sont attaquées par le mordant ordinaire du verre, l'acide fluorhydrique; les couches épaisses ne peuvent être insolées à fond, si longue que soit l'exposition. D'autre part la gélatine est attaquée par l'acide.

D'où le détour très curieux que voici.

On nettoie la face du verre à graver à l'acide azotique (quelques heures), à l'eau, enfin avec un mélange d'alcool et d'ammoniaque. On sèche. On chauffe légèrement; on couvre d'une couche de vernis *épais* (bitume 20 gr., essence de térébenthine 60 cm³, benzine 60 cm³) *qui ne jouera aucun rôle photographique.*

On fait sécher, à la lumière si l'on veut.

Sur ce vernis on étend dans l'obscurité une couche *sensible* de gélatine bichomatée. On fait sécher. On expose *assez longtemps* sous un positif (§ 312).

On développe à l'eau chaude. On met donc à nu, non plus le substratum, mais la couche épaisse de vernis. On sèche, on traite alors par la benzine qui attaque le vernis et met à nu le substratum (dans l'espèce la plaque du verre).

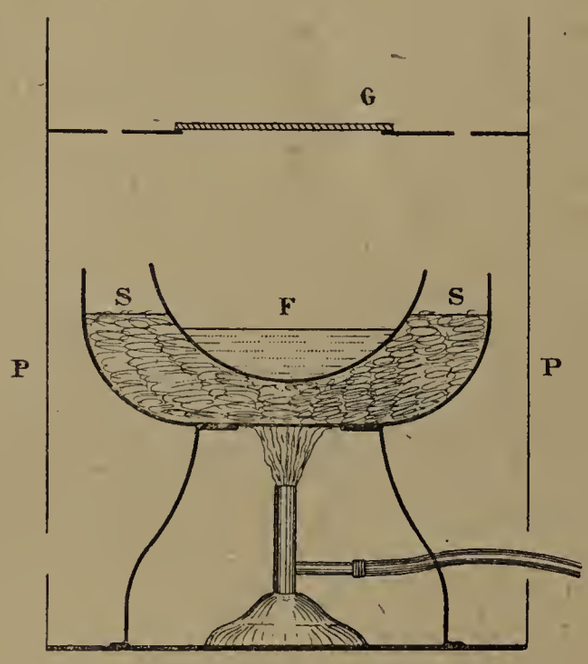


Fig. 260.

Il ne reste plus qu'à attaquer celui-ci.

2° — Attaque par l'acide fluorhydrique.

Pour graver on se sert d'une caisse en plomb P placée sous une hotte.

On met dans une capsule de plomb un mélange de fluorure de calcium (spath fluor) en poudre et d'acide sulfurique.

On chauffe légèrement au bain de sable S.

Des vapeurs d'acide fluorhydrique se dégagent :

$$CaFl^2 + SO^4H^2 = SO^4Ca + 2HFl.$$

Elles sont très dangereuses à respirer.

Elles attaquent le silicium et les silicates, par conséquent le verre :

$$SiO^2 + 4HFl = SiFl^4 + 2H^2O.$$

Le verre est dépoli; les traits du dessin sont opaques par transparence.

3° — Attaque au jet de sable.

Le procédé est purement industriel, vu le matériel qu'il exige.

Une soufflerie actionnée par une machine lance un jet de sable sur la

glace. *Le sable est sans action sur la réserve qui est relativement molle*; il n'agit que sur le verre et le dépolit.

386. **Photogravure en demi-teintes (photoaquatinte).**

1° — La plaque de cuivre est préparée comme pour l'aquatinte, c'est-à-dire couverte d'un grain régulier de résine fixé par chauffage (§ 377).

Effectuons une épreuve sur papier *mixtionné* comme pour obtenir une photographie au charbon (§ 314); exposons sous un positif.

Comme support de développemeut prenons la plaque de cuivre (§ 315). Plaçons celle-ci face en dessus dans une cuvette pleine d'eau *froide*. Plongeons-y le papier face en-dessous, en évitant les bulles d'air. Maintenons le papier contre la plaque en le repérant convenablement. Sortons le tout d'un mouvement brusque. Couvrons d'un buvard; éliminons l'excès d'eau et appliquons fortement avec un râteau sans dents.

Remettons dans une cuvette pleine d'eau, élevons peu à peu la température; le papier se retire aisément en abandonnant la gélatine sur la plaque. Continuons le développement à 45° : la gélatine bichromatée se dissout. On retire la plaque et on sèche.

2° — La morsure s'effectue *à travers la gélatine* au moyen d'une solution de perchlorure de fer; elle est d'autant plus rapide, par suite d'autant plus profonde que la couche de gélatine est moins épaisse, qu'elle a été moins impressionnée : les creux de la plaque de cuivre, par suite les noirs de l'épreuve, correspondent donc aux parties peu impressionnées : d'où la nécessité d'utiliser un positif pour obtenir l'épreuve au charbon.

Je n'insiste pas sur les divers stades de la morsure, la concentration des bains, etc..., qui sont de pure technique.

CHAPITRE IX

PROCÉDÉS D'IMPRESSION ET DE REPRODUCTION EN RELIEF

387. **Typographie. Classification des caractères.**

1° — Tout le monde sait que la composition typographique est faite au moyen de caractères *mobiles*. Ce sont des prismes droits, de 24 millimètres de hauteur, qui portent la lettre *à l'envers* sur une de leurs extrémités.

On appelle *corps* leur grandeur dans le sens de la hauteur des lettres. Le corps se mesure en points *Didot*; six *points* valent une *ligne* (ancienne mesure) de 2,256 millimètres. Le point vaut donc $0^{mm},376$. Les corps des caractères couramment employés vont de 5 à 12 points; voici la table de concordance.

Points	5	6	7	8	9	10	11	12
Millimètres	1,88	2,26	2,63	3,01	3,38	3,76	4,14	4,51

Le point de l'*Imprimerie Nationale* vaut $0^{mm},40$; mais il n'est employé que là.

L'ancien point *Fournier* vaut $0^{mm},35$.

Pour déterminer le point, on mène deux lignes passant : l'une par l'extrémité des queues supérieures, l'autre par l'extrémité des queues inférieures des *lettres à queues* (*b*, *d*, ...*p*, ... *g*,); le point est égal à leur distance. On vérifiera que les majuscules ne sont pas plus hautes que les lettres à queue.

2° — *L'épaisseur* des caractères dépend de la lettre (il est clair que le *i* est moins large que le *m*) et de *l'œil*, c'est-à-dire de la forme donnée à la lettre. L'épaisseur est égale à *l'œil* plus *l'approche*, *blanc* laissé entre deux lettres consécutives. Pour un même point (même hauteur des lettres), on peut, suivant la fantaisie, avoir des *œils* extrêmement différents : la lettre est élancée ou trapue, les queues sont courtes ou longues relativement au reste de la lettre, les petits traits placés en haut ou en bas des lettres (*obit* et *empattement*) sont horizontaux ou inclinés, etc., etc,... Bref c'est par centaines que l'on compte les types de caractères. Ils se ramènent à quelques fondamentaux : *Gothique*, *Elzévir* ou *Romain*, *Didot*, *Italique*, *Cursive*....

3° — Pour obtenir une ligne on place côte à côte des caractères et des *blancs*. La composition est *pleine*, *non interlignée*, quand les lignes se touchent. Pour donner de l'air et de la solidité à la composition, on *interligne* : on met entre deux lignes une lame mince, plus basse que la lettre et d'épaisseur mesurée en points. Entre les mots on intercale des *blancs* qui sont des prismes de même corps que les lettres, plus bas, et dont l'épaisseur variable est aussi mesurée en points.

Ainsi la composition de ce volume est en IX interligné de 2 points.

388. **Spécimens de caractères typographiques.**

Huit Elzévir interligné 1 point.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez

Neuf Elzévir interligné 2 points.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares,

Dix Elzévir interligné 3 points.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents bar-

Huit Didot interligné 1 point.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez

Neuf Didot interligné 2 points.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée

de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares,

Dix Didot interligné 3 points.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez les Cimmériens bons et vertueux qui habitent au bord d'une mer sombre, hérissée de rochers, toujours battue par les orages. On y connaît à peine le soleil. Les nuages y paraissent sans couleur et la joie même y est un peu triste.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares,

Neuf Égyptien.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez

Neuf Normand.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares,

Neuf Antique.

Je suis née, déesse aux yeux bleus, de parents barbares, chez

389. Lisibilité des caractères.

1° — Il faut évidemment que les caractères soient lisibles. Les gros caractères sont toujours lisibles; il n'en est pas de même des petits.

Chaque caractère a une *forme typique* qui le fait reconnaître sous tous ses enjolivements. L'expérience montre que le caractère d'imprimerie est reconnaissable surtout par sa partie supérieure. On continue à lire aisément après avoir recouvert avec une bande de papier la moitié inférieure d'une ligne d'impression; on ne peut plus lire après avoir recouvert la moitié supérieure. De là à conclure qu'on peut racler les lettres par-dessous, il y a un abîme. Tout de même si on remplace les longues inférieures par de petites capitales, on diminue moins la lisibilité qu'en remplaçant les longues supérieures.

Javal (qui s'est occupé de la question avec des préoccupations *a priori* sur lesquelles je n'insisterai pas) prétend que la visibilité dépend surtout de la *largeur* des lettres (*œil et approche*) et beaucoup moins de leur *hauteur* mesurée par le *corps*. On peut lui accorder que des lettres hautes mais très étroites sont *illisibles*; mais je ne vois vraiment pas, dans les spécimens qu'il donne, une raison de croire qu'il y ait avantage à exagérer l'écartement de lettres dont le corps est petit. Au surplus le lecteur n'a qu'à se reporter aux spécimens de VIII donnés ci-dessus : le texte à lettres écartées n'est pas plus lisible que l'autre.

En définitive le problème se pose de la manière suivante : *Dans une*

page de surface utile donnée, on veut caser un certain texte; comment choisir le caractère pour être le plus lisible? Si l'on suppose la composition *pleine, sans interlignage*, la section droite *moyenne* des caractères est par suite donnée; le produit *largeur moyenne* × *corps* est imposé. Il est évident qu'il y a une juste mesure à garder entre les facteurs de ce produit. Mais en admettant qu'on puisse définir un corps de lisibilité maxima, précisément parce qu'il s'agit d'un maximum, de petites variations au voisinage des valeurs que prennent alors les facteurs du produit, n'ont aucune importance. C'est ce qui explique l'existence de tant de caractères différents *d'une lisibilité à peu près égale.*

2° — Le même problème se pose à propos de l'œil du caractère, de son appoche et de l'interlignage. Faut-il laisser des blancs ou avoir une typographie compacte? que doit être la marge?

Il est absolument impossible de dire quoi que ce soit de général, sinon que la marge est de pur luxe; il est absurde de l'exagérer parce qu'elle ne favorise évidemment en rien la lisibilité. Il ne faut cependant pas la diminuer outre mesure, ne serait-ce que pour ne pas faire apparaître trop brutalement les imperfections du pliage et de la reliure.

J'insiste là-dessus parce que les théories *a priori* genre Javal me semblent absurdes et que les fondeurs de caractères pourraient croire « scientifique » de leur obéir. L'interlignage est imposé pour certains ouvrages de composition difficile et où la solidité est nécessaire; il est évident qu'il n'a pas de raison d'être dans la composition à la linotype et qu'il serait absurde d'interligner des caractères trop petits. Il est de même évident qu'il ne faut pas faire les lignes trop longues avec de tels caractères. Mais encore une fois que peut-on dire de général quand tant de facteurs interviennent et que le bon sens et le bon goût suffisent à maintenir les gens au voisinage de l'optimum?

Où Javal a parfaitement raison, c'est quand il conseille d'exagérer la différence des caractères et de se méfier des fantaisies des graveurs esthètes.

En définitive la conclusion est qu'on fasse ce qu'on veut pourvu qu'on n'exagère aucune des caractéristiques (œil, approche, corps, interlignage). Tout le monde comprendra que dans un ouvrage tel que celui-ci, d'établissement coûteux, il serait absurde d'économiser un peu de place et de ne pas avoir une lisibilité parfaite : le papier entre pour peu dans le prix du volume. Mais quand on vous donne un roman pour quatre sous, on ne peut pas exiger qu'il soit composé en cicéro interligné de trois points, intercalé d'espaces, avec marges étendues : si vous trouvez le texte illisible, vous avez un excellent moyen de vous tirer d'affaire en ne le lisant pas.

390. **Composition.**

1° — Les caractères sont coulés en un alliage de plomb et d'antimoine auquel on ajoute parfois de l'étain et du cuivre.

Ils sont disposés dans une boîte à casiers (*casse*) dont les *cassetins* sont proportionnés à la fréquence des lettres (ainsi le casier de *e* est trois fois celui de *b*, six fois celui de *z*) et disposés de manière que les lettres les plus fréquentes soient le plus facilement accessibles. Le compositeur *lève* successivement les lettres du texte qu'il place à sa droite; il les dispose dans le *composteur*, angle dièdre en fer fermé à un bout (fig. 261). Une petite rigole demi-circulaire venue de fonte sur le caractère (*cran*) indique par sa position le bas de la lettre et aussi le bas du caractère; de sorte que si la lettre a été convenablement *distribuée* (remise dans la casse), l'ouvrier n'a pas besoin de la regarder pour la disposer convenablement dans le composteur.

2° — Une coulisse C serrée par une vis V permet de donner au composteur la longueur convenable (longueur de la ligne, *justification*). On

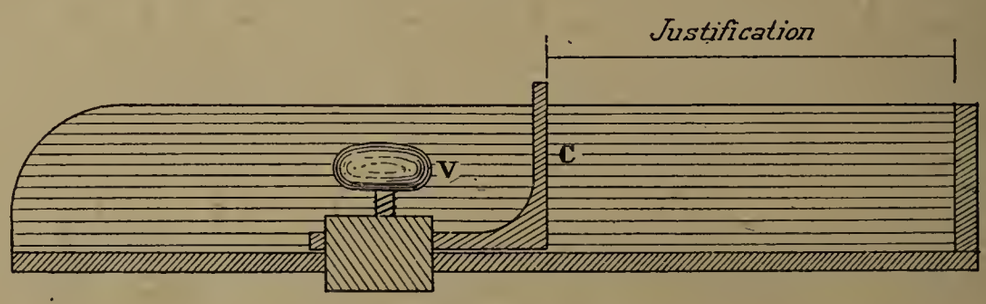


Fig. 261.

s'arrange avec des blancs pour que dans la ligne tienne un nombre entier de mots, où ce nombre augmenté d'une fraction convenable de mot : c'est ce qu'on appelle *justifier*. La ligne justifiée, on compose au-dessus la ligne suivante en intercalant ou non une lame d'interlignage. Quand le composteur est plein, on reporte les lignes composées sur un support appelé *galée*; les lignes sont ensuite réunies en un *paquet* d'un nombre de lignes déterminé; le paquet est placé alors sur un *porte-page*.

3° — La *mise en pages* consiste à donner à chaque page sa longueur, à mettre les folios (pagination), les titres courants, les titres des chapitres, etc...; enfin à disposer les pages de *composition* les unes par rapport aux autres suivant le nombre de pages qui doit s'imprimer sur chaque côté de la feuille. Rappelons qu'il y a 16 pages par feuille pour un *in-octavo* (8 de chaque côté), et ainsi de suite. Les pages sont disposées de manière que le texte se suive *après pliage*.

391. Clichage. Stéréotypie.

Quand un ouvrage est destiné à être souvent réimprimé avec des corrections nombreuses et disséminées, force est de le conserver en *mobiles*. Citons comme exemple l'Indicateur des chemins de fer ou le Bottin. On se représente difficilement la place que tient la composition des trois volumes du Bottin, le poids et corrélativement la somme que représentent les caractères.

Si l'ouvrage ne doit être réimprimé qu'après un temps assez long et

sans corrections trop nombreuses et trop disséminées, *on le cliche* de manière à rendre disponibles les caractères (qui sont redistribués dans la casse, ou dans des casiers plus volumineux).

Le clichage consiste à mouler la composition de manière que chaque page devienne un solide; d'où le nom de *stéréotypie* donné à ce travail.

Il faut d'abord prendre une *empreinte* en creux de la page composée, au moyen d'une matière assez molle et qui puisse durcir. On se sert d'une espèce de carton (*flan*) formé de feuilles de papier superposées et séparées par de la colle de pâte dans laquelle on incorpore du blanc d'Espagne. On prépare le flan vingt-quatre heures à l'avance.

Pour prendre l'*empreinte*, on étale le flan sur la composition égalisée et légèrement graissée; on frappe avec une brosse de manière que les lettres entrent dedans et s'y moulent. On sèche à chaud et on démoule. Pour obtenir le *cliché*, on coule de l'alliage d'imprimerie dans l'empreinte légèrement talquée. On réalise ainsi un *stéréotype* : les lettres d'une page forment un bloc.

Pour les livres, on conserve les empreintes; on ne procède au clichage proprement dit que si l'ouvrage atteint un second *tirage* (je ne dis pas une seconde *édition*, parce que le mot *édition* implique que l'ouvrage est recomposé en *mobiles*).

L'avantage des empreintes, outre la disponibilité des caractères, est de n'exiger pour leur conservation qu'un emplacement restreint, ce qui n'est pas le cas de la composition en mobiles. Leur prix est modique.

Le clichage est indispensable à la composition des journaux parce qu'il permet de multiplier les clichés d'une même composition, par suite d'imprimer sur plusieurs presses et surtout d'utiliser la machine rotative (§ 394).

Quand il s'agit de caractères très beaux dont on veut conserver tous les déliés, on prend l'empreinte en gutta, on la métallise et on obtient le relief par la galvanoplastie. Le galvano étant très mince (de l'ordre de 50 μ), on le *double* avec de l'alliage d'imprimerie : on le pose sur un marbre, on le garnit de réglettes d'acier formant une cuve peu profonde dans laquelle on coule le métal fondu.

392. **Linotype.**

1° — Nous avons supposé que les caractères sont à notre disposition. Pour faire comprendre le principe des machines à composer (universellement employées pour les journaux), revenons un peu en arrière. La matière formant le caractère d'imprimerie est un alliage de 100 de plomb, 15 d'antimoine, 6 d'étain, par exemple. La température de fusion est basse; il est dur et non cassant. On obtient le caractère en le coulant dans des moules en acier; la lettre est gravée sur l'extrémité d'une tige d'acier (*matrice*) qui sert de fond à la cavité dans laquelle l'alliage d'imprimerie est envoyé liquide.

Cette fabrication se fait aujourd'hui mécaniquement.

2° — Le principe de la *linotype* (*line of type*, ligne de composition) est de composer chaque ligne non plus avec les caractères, mais avec les matrices servant à obtenir les caractères. La ligne entière une fois composée, on la coule et l'on redistribue les matrices. De sorte qu'on imprime sur du caractère toujours neuf, puisque l'impression effectuée, on refond les lignes qui ont servi.

J'indiquerai seulement le principe des diverses opérations.

Les matrices sont disposées dans des rigoles inclinées (une par lettre) qui sont respectivement ouvertes au moyen des touches d'un clavier; la

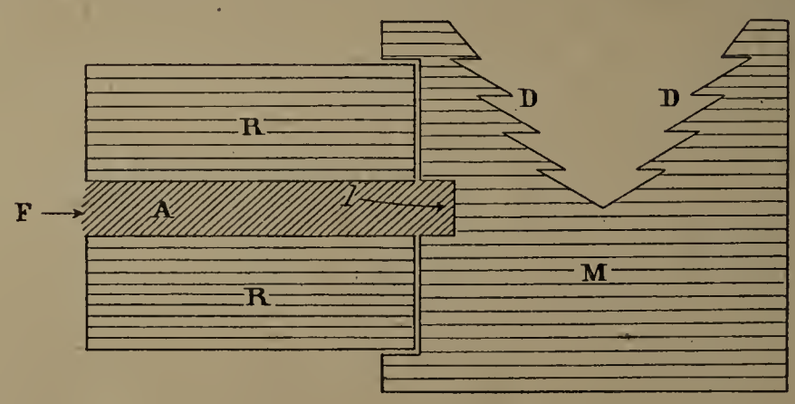


Fig. 262.

lettre tombe sur une courroie sans fin qui l'entraîne et vient la placer à côté des lettres précédentes. On compose ainsi la ligne lettre par lettre en intercalant les *blancs* convenables. La figure montre en M la forme des lettres vues de côté; la partie gravée est en *l*.

La ligne est saisie par une sorte de main et amenée en regard d'une pièce RR creusée d'une ouverture rectangulaire vue en coupe. Elle forme les parois du moule A dont le fond est constitué par la série des lettres. Un piston envoie dans le moule une quantité convenable d'alliage chaud qui se solidifie.

Une lame prismatique servant d'éjecteur pénètre dans le moule, suivant la flèche F, pousse la ligne coulée et les matrices. La ligne tombe dans une sorte de boîte (*gallée*); les matrices sont reprises par une main qui les amène devant l'extrémité de la barre à distribuer, longue règle cannelée située au-dessus de la partie supérieure des rigoles.

Il s'agit de remettre automatiquement les matrices dans leurs rigoles respectives, de manière qu'elles puissent indéfiniment resservir. Pour cela elles sont entaillées de dents DD auxquelles correspondent les cannelures de la barre. Le nombre et la grandeur des dents D varient suivant la lettre; les cannelures se modifient le long de la barre, de manière que les matrices soient retenues en l'air par leurs dents entrant dans les cannelures, *excepté quand elles passent au-dessus de la rigole qui leur correspond*. Une vis sans fin les pousse doucement le long de la barre jusqu'à ce qu'elles échappent.

La mise en pages se ramène ainsi à l'empilement des lignes fondues

LAVIS REPRODUIT *en gravure sur bois* (§ 393).

isolément. La correction consiste à recomposer la ligne fautive. La vitesse de composition est de 4000 caractères (lettres ou blancs) par heure. Le seul inconvénient de la linotype est la complexité de son mécanisme, par suite la nécessité d'avoir des machines de rechange et un mécanicien en permanence.

393. Gravure sur bois.

Graver sur bois c'est obtenir dans une plaque de bois une sorte de grand caractère d'imprimerie de forme telle qu'il constitue un dessin. C'est creuser une planche là où doit exister du blanc ; c'est *épargner* les régions où l'encre doit adhérer. La besogne du graveur consiste à créer les blancs et à ménager les noirs.

Quand on employait comme bois (nécessairement dur et compact) du *poirier de fil* (poirier coupé en long comme les planches ordinaires), on usait comme outil de lancettes et de canifs pour les traits, de gouges pour les grandes surfaces.

Aujourd'hui on emploie ordinairement du *bois debout* (généralement du buis coupé normament aux fibres) ; les outils sont des burins.

Le dessin est tracé sur le bois à la plume, au pinceau, au crayon, ou par la photographie. Il est tracé à l'envers, le tirage du bois devant le remettre à l'endroit. Le graveur ou *tailleur d'images* creuse ou coupe le bois aux endroits qui ne doivent pas être encrés et qui correspondent aux blancs de l'épreuve. Au contraire il ménage à la surface du bois les parties qui au tirage donneront les noirs, c'est-à-dire le dessin. Quand il s'agit de travaux soignés, on ne se contente plus de dessins schématisés ; on réalise, avec des hachures, une véritable gravure au burin inversée, c'est-à-dire dont les creux viennent en blanc ; en cela consiste le bois *d'interprétation*.

Dans ce cas le dessin à reproduire est photographié sur le bois (à l'envers au moyen d'un cliché retourné) à l'aide d'une solution de prussiate de potassium et de citrate de fer (§ 305) ; le graveur devient un artiste qui *interprète* à sa façon par des hachures habilement choisies le modèle qu'on lui donne en dégradé.

Les lettres qui servent à composer les affiches, sont en bois dur (généralement de cormier) découpé à la machine. On les fait mariner dans l'huile assez longtemps pour bien s'imprégner et ne plus prendre l'eau. Au surplus, rien n'empêche de découper les lettres avec un canif dans une plaquette de bois dur et de les coller sur une autre pièce de bois.

La gravure sur bois conserve une importance considérable pour des raisons intéressantes. Le *bois* s'imprime sur n'importe quel papier, tandis que la *simili* (§ 400) ne s'imprime que sur papier *couché* (papier recouvert d'une couche de matières minérales). Le papier couché est plus cher et *plus lourd* ; d'où un surcroît de dépense pour l'affranchissement. On conçoit que les grands magasins de nouveautés préfèrent le

bois pour les catalogues ordinaires qu'ils envoient en nombre fantastique. Les dessins à la plume au trait reproduits sur zinc (§ 397) n'ont jamais la *propreté* du bois qui plaît à la clientèle bourgeoise.

394. **Presse. Presses rotatives.**

Le procédé d'encrage de la forme résulte de ce fait que les reliefs doivent venir en noir et les creux en blanc. Il faut donc encrer, non plus comme en taille-douce avec un tampon qui bourre l'encre dans les creux inégalement profonds, mais avec un rouleau cylindrique qui ne laisse d'encre que sur les parties qu'il peut toucher, c'est-à-dire sur les reliefs tous sur le même plan.

La pression à exercer est moindre qu'en taille-douce, puisqu'il n'est plus nécessaire de faire entrer le papier, de le *fouler* plus ou moins dans les tailles.

L'encrage mécanique est obtenu au moyen d'une série de rouleaux roulant les uns sur les autres : de l'encre déposée sur le premier passe successivement aux suivants en s'étalant d'une manière de plus en plus régulière; les derniers reposent sur la forme qu'ils encrent uniformément.

La question du mouillage du papier en typographie est complexe et controversée. Je ne la signale qu'en raison de la locution si souvent employée « les épreuves encore humides ». Pour les journaux on pratique un mouillage léger, ce qui légitime la locution susdite. Mais le mouillage n'est pas indispensable; il a l'inconvénient de donner un foulage excessif : les caractères viennent *en creux*. Au reste on ne mouille jamais le papier couché : par exemple, le présent volume est tiré à sec. Il y a donc une foule de distinctions à établir : je n'insiste pas.

L'impression est obtenue parfois au moyen d'un plateau déplacé normalement à la forme et qui applique contre elle le papier recouvert d'une épaisseur convenable de carton et de cuir (la forme est immobile). Elle est obtenue le plus souvent au moyen d'un cylindre : la forme est alors mobile comme dans la presse en taille-douce.

Dans les machines rotatives, la forme est clichée et les clichés sont cintrés, les caractères en dehors, pour épouser le cylindre imprimeur. L'encrage se fait comme précédemment avec des rouleaux; l'impression a lieu par pression du papier entre le cylindre porte-cliché et un cylindre de contre-pression.

La machine est dite *en blanc* quand elle n'imprime qu'un côté, à *retiration* quand elle imprime le recto et le verso. Il n'y a du reste qu'à doubler la machine en blanc pour obtenir la machine à retiration.

395. **Conditions de l'impression typographique.**

1° — Avant d'aller plus loin, fixons nos idées sur les conditions de l'impression typographique.

L'encre prend sur une surface *plane*, creusée aux endroits où l'on

veut réserver des blancs. Le creux n'a pas toujours besoin d'être considérable. Assurément quand les blancs ont une grande surface, pour que l'encre épargne le creux, il faut une dénivellation notable; mais avec du papier suffisamment glacé, des rouleaux bien travaillés et une encre convenable, on peut la réduire. C'est plutôt une question de perfection pour la presse qu'une nécsssité inhérente au procédé.

Lorsqu'il s'agit de traits fins et de points rapprochés, le creux peut être minime, de l'ordre du dixième de millimètre. Celui qui n'a vu que des compositions en caractères, est fort étonné quand on lui montre une gravure *en relief* représentant une figure intercalée dans le texte, conséquemment à tirer en typo.

En lisant les paragraphes relatifs à la photogravure en relief, le lecteur ne doit donc pas se représenter des creux de l'ordre du millimètre, mais bien de l'ordre du dixième de millimètre, au moins dans les parties les plus délicates du dessin.

2° — Ce serait une erreur absolue de croire qu'il suffit de mouler une planche destinée à la taille-douce pour obtenir une forme tirable en typo. La contre-partie d'une taille est une arête coupante, d'autant plus proéminente que la taille est plus large : elle ne donnerait en typo qu'une ligne mince et couperait le papier si elle dépassait trop le niveau général. Le tirage en typo exige des réserves plus ou moins larges sur une surface *plane*, les creux ne servant qu'à séparer les réserves et ne devant avoir que l'épaisseur nécessaire pour que l'encre n'y prenne pas.

Assurément en typo comme dans tous les procédés d'impression, les épaisseurs d'encre ne jouent aucun rôle; seules interviennent l'aire des surfaces encrées. Mais tandis qu'en taille-douce on augmente cette aire par l'élargissement des tailles (ce qui pratiquement nécessite leur approfondissement), en typo les surfaces encrées font toutes parties du même plan général.

Les demi-teintes s'obtiennent dans tous les cas par la répartition en rapport variable du noir et du blanc.

Nous verrons qu'on prépare par morsure des formes tirables en typo. Mais tandis que l'aquafortiste attaque là où il veut un noir, le typographe attaque là où il veut une réserve : il protège contre la morsure les régions qui doivent venir en noir.

396. Papiers peints, étoffes imprimées.

Les papiers peints et les étoffes imprimées s'obtiennent au moyen de machines rotatives et de rouleaux. Dans les deux cas, les machines sont identiques, à la différence près que la pression est plus forte pour le papier que pour l'étoffe. On commence par exécuter des rouleaux portant en relief les images périodiques à imprimer; un tour correspond à une période. L'encrage des rouleaux a lieu comme dans les machines rotatives, par roulement sur d'autres rouleaux. Comme ici le repérage des couleurs les unes par rapport aux autres n'a qu'une importance

secondaire, le papier ou l'étoffe en longue bande passe successivement sous des rouleaux chargés des diverses couleurs. Certaines machines impriment successivement jusqu'à vingt couleurs.

Pour les étoffes, on peut imprimer directement la couleur. On peut imprimer avec un mordant sur lequel la couleur se fixera par immersion ultérieure dans un bain de teinture; un lavage enlève la couleur des portions de l'étoffe non mordancées. On peut imprimer avec une matière formant réserve; le bain de teinture ne prend qu'en dehors de ces réserves. Enfin on peut teindre en entier et imprimer un rongeant.

Typographie sur zinc.

397. **Gravure du zinc en relief (gillotage).**

1° — On appelle *gillotage*, du nom de son inventeur Gillot, un procédé de morsure du zinc permettant d'obtenir des creux assez profonds tout en conservant les finesses du dessin.

On dessine à l'encre grasse sur papier autographique comme pour obtenir un report (voir plus loin, § 406). Sur une plaque de zinc polie, ou finement grainée suivant les cas, de 2 à 4 millimètres d'épaisseur, on pose le dessin face au zinc. On mouille *au dos* par application de papier humide, afin que le papier autographique s'applique bien. On décalque par pression. On retire le papier autographique; le dessin reste sur le zinc. Nous verrons plus loin que cette opération s'appelle *un report sur zinc*; sur ce report, on peut tirer en lithographie si l'on tient le zinc toujours humide.

On décape à l'acide, on encre exactement comme pour obtenir une épreuve lithographique, mais avec une encre spéciale à base de cire et de résine.

Ici commence le passage à la typo; il s'agit de creuser autour des traits à une profondeur telle que les blancs ne soient pas touchés par le rouleau encreur typographique. On profite pour cela de ce que l'encre utilisée est inattaquable par l'acide azotique. On mord donc à l'acide étendu, d'où un commencement de relief. On continue les morsures en ayant soin de réencrer à mesure : le noir ne prend que sur le noir en raison des propriétés du zinc *mouillé*.

Quand le creux est assez profond, on nettoie la plaque de son noir. Elle est prête pour l'impression en typo, c'est-à-dire pour le mode d'impression dans lequel le noir est fixé sur les reliefs par contact du rouleau *qui n'atteint pas les creux*, et avec une pression assez faible pour que le papier n'entre pas dans ces creux.

2° — Technique.

La description précédente trop schématique laisserait une idée fausse du gillotage. *Ce procédé très curieux de morsure donne des creux dont*

CRAYON LITHOGRAPHIQUE DE COROT REPRODUIT PAR LE PROCÉDÉ DU § 397 (*gillotage*).

la profondeur est proportionnelle à la distance des reliefs à conserver, si l'on veut, *à l'aire des blancs.*

La planche est recouverte de la réserve d'encre grasse (fig. 263, 1) et d'un vernis sur les bords et au dos. Elle est placée dans de l'eau acidulée qui mord *légèrement*. Agitons la cuvette; la réserve ne tarderait pas à être minée si on prolongeait l'action; on détruirait les parois minces, séparant les blancs voisins. Bornons-nous donc à une morsure peu profonde (fig. 263, 2) à peine sensible à l'ongle.

Retirons la planche, séchons-la.

Le problème est de protéger les parois verticales des sillons et de ne creuser que leur fond.

On met la planche sur une table de fonte chauffée; l'encre se liquéfie et descend légèrement le long des parois qu'elle protége. On laisse refroidir; on encre à nouveau, on saupoudre de résine qui adhère seulement aux parties encrées : on mord.

On recommence ainsi jusqu'à dix ou douze fois. Chaque fois l'encre glisse un peu plus loin, diminuant de plus en plus la superficie du creux, de sorte que les sillons minces sont bientôt bouchés par elle. Les morsures successives n'agissent donc que sur les parties de la planche qui correspondent aux blancs de plus en plus étendus. A mesure que le nombre des morsures augmente, les finesses s'empâtent; à la fin de l'opération, on obtient un placard absolument noir.

A chaque morsure on augmente l'acidité du bain.

La morsure terminée on lave la planche à la benzine et à l'eau potassée.

On procède alors à *l'arrondissement*. La planche est encrée à chaud avec un rouleau lisse et dur et une encre grasse quasi solide.

On refroidit et on attaque par un acide assez concentré qui aplanit les talus (fig. 263, 6).

Il ne reste plus qu'à enlever à la scie les parties qui correspondent à des blancs très étendus et le pourtour du dessin.

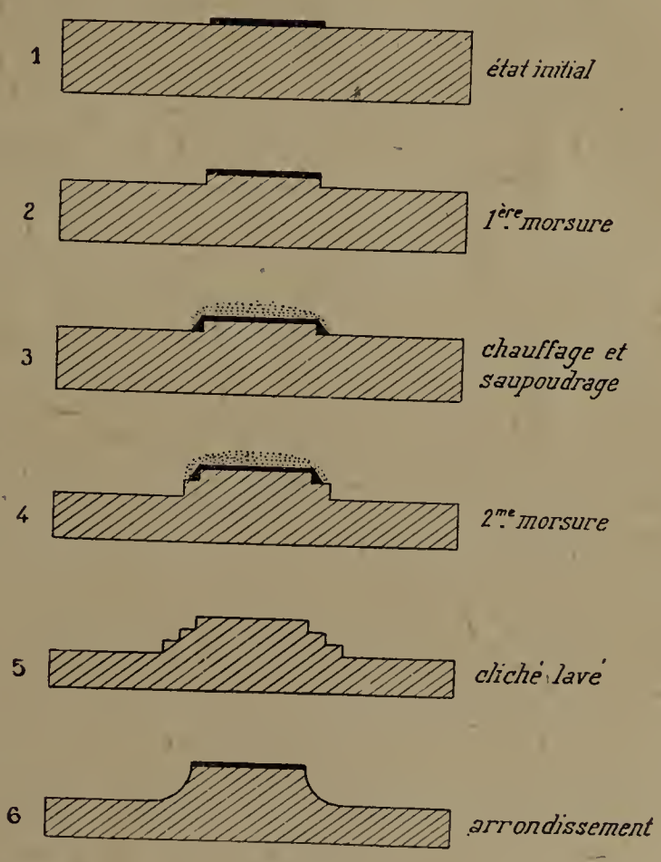


Fig. 263.

La gravure demande plusieurs heures. *Elle est plus facile pour un dessin compliqué et bien rempli que pour un trait ou un point isolé.*

Le prix est au centimètre carré, larges blancs compris, ce qui paraît d'abord absurde et se trouve pourtant très justifié.

On n'obtient jamais par ce procédé la franchise de trait du burin ni de la gravure sur bois; reste à savoir si c'est une qualité ou un défaut.

398. Photogravure au trait : emploi du bitume de Judée.

Dans ce qui précède nous supposons que le report sur zinc est possible. Nous avons donc à notre disposition soit une planche gravée, soit une pierre ou un zinc capables de donner une épreuve, soit un bois ou une composition typographique; nous tirons à l'encre *grasse* (dite *de report*) et nous décalquons sur zinc (§ 406).

Si nous ne possédons qu'un dessin à l'encre de Chine au trait, le report direct est impossible; nous utilisons la photographie.

Première opération : nous obtenons du dessin un négatif sur plaque photographique ordinaire. Aux traits noirs correspondent donc sur le cliché des traits transparents.

Nous recouvrons alors le zinc dans l'obscurité d'une couche de bitume de Judée dissous dans la benzine (§ 381); nous faisons sécher; nous insolons sous le négatif. Nous développons à l'essence de térébenthine qui dissout le bitume non insolé. *Les traits subsistent en bitume.*

Celui-ci fixe l'encre d'impression. Nous encrons donc le zinc légèrement mouillé et nous continuons comme plus haut la morsure, par conséquent la mise en relief des traits noirs.

399. Photogravure au trait : emploi de l'albumine.

Le bitume a le grave défaut d'être médiocrement sensible à la lumière; d'où l'emploi d'albumine bichromatée. Mais celle-ci résiste mal aux acides; d'où la nécessité de lui donner de la résistance par incorporation d'une poudre (comparer au § 385).

Nous avons dit au § 295 comment on prépare l'albumine. Pour la sensibiliser on dissout dans 1 000 grammes d'eau, 100 grammes d'albumine et 16 grammes de bichromate d'ammoniaque; on agite et on laisse reposer. La plaque de zinc est décapée, nettoyée et séchée. Dans l'obscurité on étend la couche sensible qu'on égalise à la tournette (§ 383). On expose sous un négatif. L'albumine devient insoluble sous l'action de la lumière.

Pour une raison que nous verrons tout à l'heure, on passe sur la couche un rouleau chargé d'encre à report diluée dans un peu d'essence de térébenthine : elle devient gris foncé. On développe à l'eau froide et on enlève l'albumine soluble avec un tampon de coton. On rince et on sèche. On a donc recouvert la plaque métallique d'une couche d'albumine *encrée* qui correspond aux traits transparents du négatif, aux traits noirs de l'objet.

Il s'agit de lui donner de la résistance. On utilise pour cela une poudre très fine (composée de 60 grammes de bitume, 25 de poix noire, 15 de résine) qu'on applique avec un pinceau doux. La poudre prend

sur les parties encrées. On rejette l'excès de poudre; on chauffe le zinc sur une plaque de fonte. La poudre fond et donne avec l'albumine un vernis capable de résister à l'action des acides.

400. — **Obtention de demi-teintes. Emploi de réseaux ou de trames (similigravure).**

1° — L'impression ne connaît pas les demi-teintes; le noir vient ou ne vient pas. Les noirs plus ou moins intenses sont obtenus par l'espacement plus ou moins grand de traits noirs plus ou moins larges, ou de points noirs plus ou moins gros. D'où résulte qu'en appliquant le procédé ci-dessus décrit à une photographie ordinaire possédant des demi-teintes, l'insolation insuffisante, ne rendant le bitume que superficiellement insoluble, équivaut une insolation nulle; l'insolation suffisante insolubilise le bitume jusqu'au substratum, par suite donne un noir uniforme et indépendant de l'intensité de la lumière.

Comme nous exposons la couche de bitume sous un négatif, dans le premier cas le bitume est enlevé, le zinc est creusé : nous avons du blanc sur la feuille imprimée; dans le second, le bitume insoluble protège le zinc : nous avons du noir.

2° — Pour obtenir les demi-teintes, on utilise un *réseau*.

C'est généralement un quadrillage très fin (de 35 à 70 traits au centimètre) de traits opaques gravés ou photographiés sur une glace. Parfois ce sont des points opaques régulièrement distribués aux sommets d'un quadrillage géométrique. L'épaisseur des traits noirs est égale à l'épaisseur des traits transparents; elle est parfois moitié moindre; peu importe du reste.

On effectue le négatif (au moyen duquel on insolera le bitume) en plaçant le réseau dans la chambre noire à une très petite distance de la couche sensible, de l'ordre de 2 à 5 dixièmes de millimètre.

Le rôle du réseau s'explique aisément par les pénombres : il est très remarquable que ces 2 à 5 dixièmes de millimètre aient une influence capitale sur le résultat.

3° — Montrons d'abord que si le réseau est *au contact* de la plaque sensible, il ne sert à rien.

Photographions une teinte plate. Nous avons sur le cliché l'image *parfaitement nette* du réseau, quadrillage régulier de points ou de traits. Utilisons ce négatif pour insoler le bitume. Si la pose est assez longue, le bitume devient insoluble jusqu'au substratum, il *tient* lors du développement à la benzine; le zinc est protégé contre la morsure; nous aurons des noirs à l'impression. Si la pose n'est pas assez longue, le bitume ne devient pas insoluble jusqu'au substratum, il part lors du développement, l'acide creuse le zinc; nous aurons du blanc à l'impression.

Nous ne réalisons pas la demi-teinte.

Le résultat était évident *a priori*. S'il n'est pas possible d'obtenir la

demi-teinte sans réseau, comment le serait-il du seul fait que nous avons régulièrement couvert de noir une fraction de la superficie du négatif indépendante de l'intensité de la lumière, ce qui revient à réserver en blanc cette fraction de la superficie de l'épreuve?

4° — Les choses sont bien différentes si nous écartons convenablement le réseau de la couche sensible.

La figure 264 représente le réseau éclairé par la lumière qui sort de l'objectif schématiquement réduit à son ouverture O.

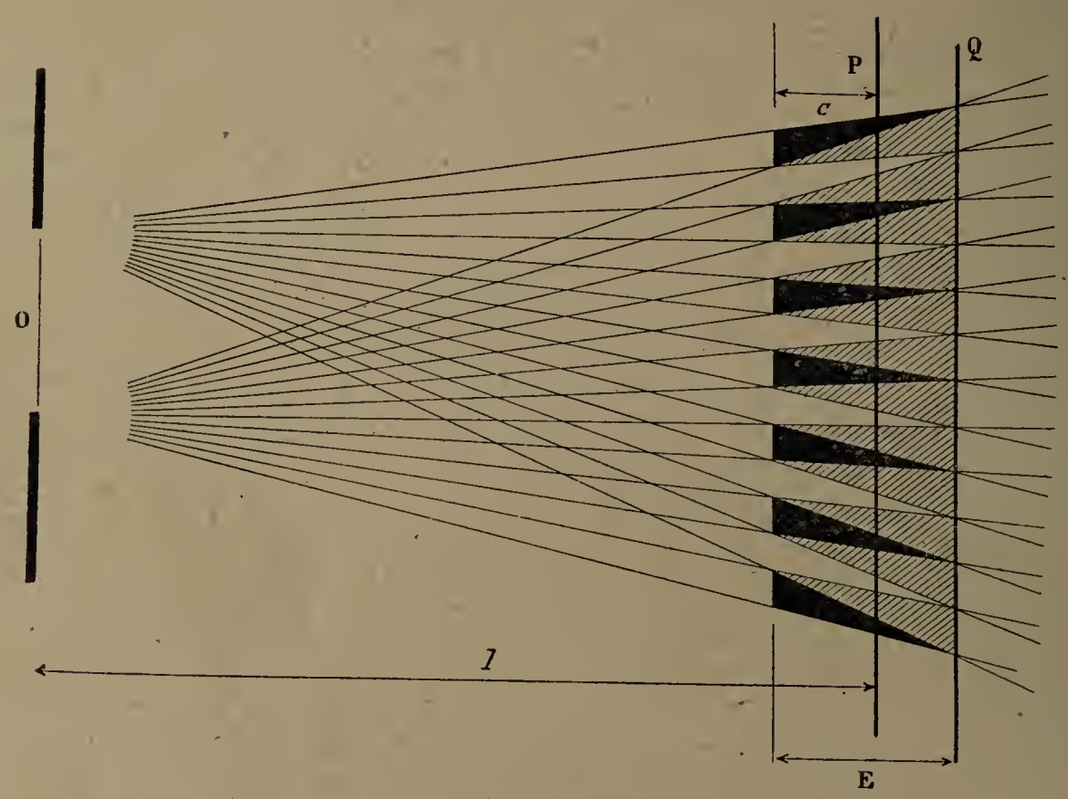


Fig. 264.

Derrière les traits opaques du réseau se produisent des ombres dont la profondeur E est sensiblement égale à :

$$E = a\frac{l+E}{O} = \frac{al}{O} = na, \qquad \text{en posant} \qquad l = nO.$$

La distance l diffère peu de la distance focale principale. Pour l'ouverture *normale* du diaphragme, on a donc : $n = 10$, $E = 10a$.

Soit un réseau contenant 50 traits au centimètre, pour lequel les pleins égalent les vides. On a :

$$a = 0{,}1^{mm}, \qquad E = 1^{mm}.$$

La longueur des ombres est donc de l'ordre du millimètre.

Mettons la couche sensible quelque part en P, entre le réseau et le plan Q dont nous venons de calculer la position. Sur la couche sensible nous n'obtenons plus l'image nette des vides : la lumière déborde. A la vérité la quantité dont elle déborde est indépendante de son intensité ; mais, à la différence de tout à l'heure, dans la pénombre l'éclairement diminue de sa valeur sans le réseau jusqu'à zéro. L'éclairement suffi-

LAVIS REPRODUIT *en similigravure* (§ 400).

(Le lecteur étudiera à la loupe la manière dont le réseau donne les demi-teintes.)

THE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF ILLINOIS

sant pour que le négatif protège le bitume, par suite pour qu'il y ait du blanc à l'impression, s'étend d'autant plus loin que la lumière est plus intense. Si elle est très intense et si P est voisin de Q, le noir du réseau est à peu près complètement mangé. Si elle l'est moins, ne vient en blanc sur l'épreuve que la partie hors de la pénombre. La demi-teinte résulte de la variation de grandeur sur la plaque sensible des parties assez noires pour protéger le bitume contre l'insolubilisation jusqu'au substractum.

5° — En définitive, quand on regarde avec une loupe assez grossissante une image obtenue au moyen d'un réseau formé d'un quadrillage de traits opaques, on constate d'abord aisément l'existence du réseau. On constate de plus que les parties du papier venues noires ou laissées blanches sont uniformément noires ou blanches : les blancs résultent simplement d'une diminution de l'épaisseur des traits opaques du réseau qui viendraient au noir et avec leur épaisseur réelle, si le réseau était placé au contact de la plaque sensible dans l'obtention du négatif. Dans les clairs de l'image on distingue un pointillé *noir* très fin; dans les gris, on aperçoit comme une image nette du réseau; enfin les noirs montrent un pointillé *blanc* très fin.

Le procédé est donc incapable de fournir des oppositions bien vigoureuses, puisqu'il est difficile d'obtenir du blanc pur et du noir continu.

6° — Pour se rendre compte des phénomènes, on regardera les ombres portées par une toile métallique.

M. Féry a fait des expériences systématiques sur la valeur e : E.

Il trouve les meilleurs résultats pour $E = 3e$.

Malheureusement les glaces ne sont jamais planes; la distance e est donc assez mal déterminée. Pour faciliter les réglages, on diminue l'ouverture, ce qui revient à augmenter n, et par suite E et e.

La diffraction dont on a parlé à propos du rôle des réseaux, semble bien ne pas intervenir.

401. Dessin sur papiers grainés.

Nous supposons au paragraphe précédent que l'objet est photographié à travers un réseau. Un procédé semblable est applicable aux dessins qui doivent être gillotés. Au lieu de travailler sur du papier *lisse*, l'artiste emploie du papier *grainé*, *ligné*, *quadrillé*, c'est-à-dire ayant subi un grainage tel que ses parties saillantes soient des points réguliers, une série de lignes à 45°, ou deux séries de lignes rectangulaires.

Parfois le grain est noirci de manière à former un gris normal. Les tons plus noirs sont obtenus par un crayonnage atteignant les parties creuses du grainage; les blancs sont réalisés par grattage.

402. Typos sur zinc en couleurs.

Le procédé est la combinaison du procédé trichrome de Ducos de Hauron (§ 342) et de celui des réseaux.

A partir de trois négatifs pris à la chambre noire à travers les écrans *vert*, *violet* et *orangé*, obtenons trois diapositifs (positifs transparents).

Il s'agit d'obtenir d'après eux trois négatifs *tramés*.

Pour cela on reproduit les diapositifs à la chambre noire à travers un réseau. Pour éviter les effets de moiré (§ 178), si le réseau est constitué par une série de traits parallèles et équidistants, il est mis successivement dans trois positions *voisines* de 60° les unes des autres, chaque position correspondant à un des négatifs ; si on utilise un quadrillage, le réseau est tourné d'un peu moins de 30° d'une épreuve à l'autre.

Chaque négatif sert à graver en relief le zinc sur lequel on imprime typographiquement la couleur correspondante : la seule difficulté du tirage est le repérage parfait du papier. Je rappelle que les couleurs de tirage sont le *rouge*, le *jaune* et le *bleu* vaguement complémentaire des écrans *vert*, *violet* et *orangé*.

Parfois on ajoute une quatrième planche tirant en brun ou en bleu foncé pour renforcer les traits.

Les effets obtenus par cette méthode sont surprenants ; du reste on lui demande non pas la fidélité de la reproduction, mais la franchise des teintes.

CHAPITRE X

IMPRESSION SUR UNE SURFACE QUASI PLANE LOCALEMENT MODIFIÉE

403. **Lithographie.**

1° — Le procédé tire son nom du fait que pendant longtemps on n'employait comme surface modifiée que celle des pierres calcaires. Mais il ne faut pas croire que la pierre ait des propriétés extraordinaires : tous les corps de grain fin qui se mouillent sans excès et sèchent assez rapidement, peuvent pratiquement la remplacer : par exemple, le zinc, le nickel, l'aluminium, pour ne citer que les corps industriellement utilisés. Au reste une infinité d'autres corps, le cuivre..., le verre, le celluloïd, le parchemin, la gélatine,... etc., etc., possèdent les mêmes propriétés.

La méthode est basée sur les remarques suivantes que nous présentons à propos de la lithographie proprement dite comme exemple.

Quand la pierre est *sèche*, elle retient les corps gras et résineux au point qu'on ne peut les enlever sans user la surface. Quand elle est *mouillée*, les corps gras n'adhèrent pas. D'autre part les corps gras et résineux, *qui ne peuvent être mouillés*, retiennent les corps similaires.

D'où le procédé général : *Sur une pierre sèche on dessine avec un crayon gras (crayon lithographique) ou à la plume avec de l'encre grasse. On mouille, on encre au rouleau : l'encre ne tient que sur le dessin qui ne se mouille pas et n'adhère pas sur les parties extérieures au dessin qui sont mouillées.*

On imprime en pressant une feuille de papier contre la pierre.

Reprenons les divers points de cet énoncé général.

2° — Pierres lithographiques.

Les pierres employées sont formées presque exclusivement de calcaire pur; leur grain est fin et serré.

La teinte des meilleures pierres est gris perle ou gris ardoise.

Elles viennent de Munich, de Châteauroux, du Vigan,... Leurs dimensions peuvent atteindre 200 × 150 centimètres.

Elles sont dressées, poncées et grainées par des procédés que nous avons décrits dans notre cours sur la *Construction .... des instruments*

de mesure et d'observation. Pour éviter qu'elles ne cassent si elles sont trop minces et pour égaliser leur épaisseur, on les *double* : on les superpose à une autre pierre qu'on lie avec du plâtre. Quand une composition ne sert plus, on l'efface en grainant et ponçant la pierre, ce qui entraîne une petite diminution d'épaisseur.

On commence toujours par grainer à gros grains; puis suivent le travail à effectuer, on parfait plus ou moins le polissage. Pour la plume, on ponce; pour le crayon, on réalise un grain plus ou moins fin suivant l'effet artistique à obtenir.

On a cherché sans grand succès à fabriquer des pierres lithographiques avec un mélange de craie, d'oxyde de zinc, de chaux et d'huile de lin.

3° — Encres, crayons lithographiques.

Les encres lithographiques ou encres *grasses* sont employées pour dessiner ou écrire sur la pierre.

Voici la composition d'une encre *grasse* :

Cire jaune	Suif	Savon de Marseille	Gomme laque	Noir
4	3	13	6	3

L'industrie a toujours des recettes extraordinaires. On doute légitimement de la nécessité des formules bizarres quand on entend simultanément proclamer l'excellence des mélanges les plus divers.

On prépare des encres de compositions analogues rendues liquides par de l'eau.

Les corps gras ne se séparent pas de l'eau grâce au savon qui est soluble dans l'eau et qui les dissout.

Les crayons lithographiques sont de compositions analogues mais solides. Voici une formule :

Cire jaune	Suif	Savon	Noir de fumée
32	4	24	7

Ces encres sont rendues noires uniquement pour faciliter le travail; le noir n'intervient en aucune manière. Dans certains cas on le supprime; l'encre devient transparente ou translucide.

L'encre *d'impression* qu'il ne faut pas confondre avec l'encre *grasse*, se compose de vernis et de noir de fumée comme l'encre typographique. L'encre célèbre de Lemercier contient *du pain et des oignons* : quand l'industrie abandonnera-t-elle ces recettes absurdes? S'il existe dans le pain et les oignons des principes utiles, qu'on les introduise sans les matières inutiles qui les accompagnent.

Le lecteur remarquera la différence de composition des encres et crayons *lithographiques* et de l'encre *à imprimer*. Celle-ci n'est pas grasse; elle n'a pour la pierre qu'une adhérence petite, elle ne se fixe que là où l'encre lithographique a pénétré. Cette remarque explique bien des faits qui semblent d'abord contradictoires; en particulier que

LITHOGRAPHIE REPRODUITE *en similigravure* (§ 400).

THE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF ILLINOIS

tant de corps et des plus divers puissent remplacer la pierre lithographique : en définitif on ne demande à celle-ci que de pouvoir être mouillée et de retenir les corps gras quand elle est sèche.

4° — Préparation de la pierre.

L'expérience montre qu'une fois le travail de l'artiste terminé et avant de passer au tirage des épreuves, il faut que la pierre subisse une *préparation*. On la traite par une solution contenant (en moyenne, 800 grammes d'eau, 200 grammes de gomme arabique et 10 grammes d'acide nitrique.

Voici les expériences prouvant l'utilité de la préparation.

Sur une pierre propre et sèche, dessinons au crayon lithographique. Humectons avec une éponge et tirons des épreuves sans remouiller. Peu à peu les traits s'élargissent et s'empâtent, des taches apparaissent partout où la pierre sèche.

Préparons la pierre avec une solution de gomme arabique : nous pourrons tirer plus d'épreuves sans remouiller ni faire de taches; mais peu à peu les traits s'empâtent. Enfin préparons la pierre avec une solution de gomme arabique et d'acide: outre que la pierre est nettoyée et légèrement décapée, l'expérience montre que les traits ne s'empâtent plus et que les taches n'apparaissent pas, à la seule condition de remouiller à l'eau pure avec une éponge humide avant le tirage de chaque épreuve.

En définitive sur la pierre polie ou grainée, propre et sèche, on dessine avec le corps gras. On *prépare* avec une solution acide et gommée; on encre au rouleau et on imprime. On passe une éponge légèrement mouillée, on encre et on imprime;... et ainsi de suite.

Je néglige des détails purement techniques.

404. Travaux lithographiques à la plume, au crayon

1° — Dans une infinité de travaux lithographiques, on écrit ou on dessine sur la pierre avec de l'encre lithographique de la consistance de l'encre ordinaire et des plumes spéciales.

L'écriture demande un long apprentissage car il faut écrire *à l'envers*. Comme travail de ce genre, citons les factures, prospectus,... enfin, les cartes de visite.

Les dessins industriels s'exécutent au tire-ligne et à la plume.

2° — Les dessins artistiques s'effectuent au crayon lithographique.

Le dessin à reproduire est calqué sur du papier transparent à la mine de plomb ou à l'encre ordinaire. On retourne le papier, on le fixe sur la pierre avec des pains à cacheter; entre lui et la pierre, on glisse un papier frotté de sanguine (ocre rouge); enfin on suit les traits avec une pointe : l'empreinte rouge subsiste sur la pierre.

Du reste on peut esquisser directement sur la pierre au crayon non lithographique rouge ou noir; les traits ne résistent pas à l'eau acidulée et peuvent être effacés à la gomme de caoutchouc.

Le travail une fois préparé, on l'exécute au crayon lithographique (crayon gras).

Rien n'empêche l'artiste de se livrer directement à sa fantaisie avec un crayon gras sur une pierre nue. Il est bon que la pierre soit non polie, mais *grainée*, ce qu'on obtient à l'aide de sablon plus ou moins fin. Le *grain* donne aux traits une sorte de transparence, le crayon ne prenant que sur les parties saillantes. On conçoit la nécessité de noircir le crayon pour que l'artiste sache ce qu'il fait, le noir indiquant simplement la place de la matière grasse. Suivant la teinte de la pierre, l'effet produit par le dessin change du tout au tout; un dessin fait en noir sur une pierre jaunâtre ou grise, revêt un aspect tout différent quand on tire sur du papier blanc; il retrouve l'aspect initial en tirant sur du papier de Chine. Certains artistes préfèrent travailler au crayon rouge.

Le dessin est retourné par l'impression. Si l'artiste veut éviter ce retournement, il doit copier son modèle vu dans une glace.

Il faut éviter les moindres taches, par suite le contact des doigts; si l'on ne travaille pas à main levée, le poignet reposera sur une règle transversale maintenue par des cales à quelque distance de la pierre.

3° — Pour enduire la pierre d'encre grasse, tous les outils sont bons en définitive.

On peut préparer les fonds avec un tampon qui, chargé plus ou moins de noir et plus ou moins appuyé, donne une grisaille plus ou moins foncée en ne fixant l'encre que sur les parties les plus saillantes des grains de la pierre. Pendant ce travail il est bon de protéger les parties de la pierre qu'on réserve, avec une couche d'eau gommée. On enlève ensuite la gomme avec une éponge mouillée, on laisse sécher et on continue le dessin au crayon par exemple.

405. **Travaux lithographiques par reprise.**

1° — La méthode consiste à couvrir uniformément la pierre d'encre grasse lithographique, puis à user les parties encrées avec un corps dur capable d'enlever la couche de pierre ayant subi l'action de la graisse. On crée ainsi des blancs.

La couche uniforme peut être obtenue par la vis ou par l'usage du crayon. Pour user la pierre, on emploie des brosses métalliques, des pointes de buis ou d'ivoire, ou même un grattoir.

Ce procédé (inverse), désigné sous le nom de *lithographie au grattoir*, est par rapport au procédé habituel (direct) ce qu'est la manière noire par rapport à la gravure. Bien entendu il peut être combiné avec le procédé direct. On peut même ne s'en servir que pour corriger des noirs trop empâtés, etc.

2° — Voici un procédé analogue.

On décalque le dessin à reproduire, on couvre uniformément d'encre lithographique. On travaille à la pointe ou au grattoir et on mord à l'acide pour obtenir des blancs. Il s'agit comme plus haut de sup-

primer partiellement la couche grasse et de faire reparaître une couche de pierre capable de se mouiller, par suite de refuser l'encre d'impression.

406. Autographie et reports.

1° — La difficulté d'écrire à l'envers et d'autres raisons que nous verrons, ont donné lieu à l'autographie et au report. On écrit à l'encre *grasse* sur du papier *autographique* (papier ordinaire couvert d'une mince couche de colle de gélatine ou de fécule); on décalque sur pierre.

Les professeurs ont l'occasion d'écrire à l'encre autographique pour reproduire leurs cours ou les feuilles de manipulations, quand ils hésitent devant la dépense d'un écrivain de métier. Ils savent que l'encre est peu fluide, que les plumes s'abîment vite, qu'il faut éviter de graisser ou tacher le papier, qu'on doit le préserver de la poussière et que les corrections sont difficiles.

Il est rare aujourd'hui que les artistes travaillent directement sur pierre; ils préfèrent le papier autographique traité au crayon ou à la plume. La jurisprudence (fixée à propos d'un curieux procès intenté par Whistler) admet qu'ils font en cela œuvre de lithographe; et c'est justice, car on ne voit pas trop en quoi le fait de ne pas dessiner à l'envers change la nature du procédé.

On décalque sur la pierre dressée, poncée et parfaitement séchée. Pour que le papier autographique s'applique bien, il faut le mouiller *au dos* en évitant que l'eau ne filtre du côté du dessin. C'est là l'écueil. Si le papier n'est pas mouillé, on obtient un dessin net, mais on risque que le papier s'applique mal et que le décalque ne soit pas complet; si le papier est trop mouillé, la pierre se mouille elle-même et refuse l'encre.

On applique le papier autographique sur la pierre, on le couvre d'une feuille de papier et on fait passer plusieurs fois sous la presse en augmentant la pression (§ 408).

Le décalque obtenu, pour retirer le papier qui doit abandonner sur la pierre la majeure partie de l'encre grasse, on le mouille largement et on tire verticalement par deux coins.

La nécessité de mouiller le papier amène un changemeut de dimensions, inacceptable dans certains travaux tels que les cartes de géographie.

2° — Fac-similé.

Quand on veut reproduire un manuscrit en fac-similé, on lui superpose du parchemin préparé à la colle d'amidon comme le papier autographique. On décalque à l'encre autographique. Pour éviter de mouiller directement le parchemin, on l'intercale pendant quelques minutes entre des feuilles de papier mouillées.

S'il est permis de sacrifier l'original, on l'enduit de colle (eau, 100;

fécule, 10; colle de poisson, 2); on fait sécher, on satine, on frotte à la sandaraque, ce qui encolle la surface. Enfin on repasse les traits à l'encre autographique. Le reste comme plus haut.

Le même procédé est appliqué aux cartes géographiques; le décalque se fait avec du papier calque autographique un peu humide. En ne repassant que les traits qui correspondent à une seule couleur (§ 409), on prépare la série des pierres nécessaires à l'impression.

3° — Reports.

Expliquons le procédé sur un cas particulier.

On veut tirer en lithographie une taille-douce dont on possède la planche. On encre la planche avec un mélange d'encre d'*impression ordinaire* (vernis et noir de fumée) et d'encre *grasse lithographique* (§ 403). On tire une épreuve sur papier autographique et on décalque sur pierre. Rappelons que pour le tirage en taille-douce le papier doit être assez fortement mouillé.

Nous avons vu que la musique est gravée en creux; mais on la tire avec la presse lithographique après report sur pierre.

On peut de même reporter sur pierre un texte composé en typo; il suffit d'obtenir une épreuve à l'encre de report sur papier autographique. On évite ainsi l'écriture de la lettre qui serait excessivement coûteuse. Les souvenirs mortuaires, par exemple, qui sont tirés en litho, ont un texte d'abord composé en typo.

407. **Gravure sur pierre.**

On choisit une pierre dure, de grain fin et serré. On la ponce, on la polit avec soin, en ne laissant aucun grain appréciable. *On en prépare la surface avec de l'eau gommée et acidulée* (§ 403). Dans ces conditions, si l'on mouille et si l'on encre au rouleau (avec de l'encre *d'impression*), l'encre ne tient pas.

Avec une brosse douce à longs poils trempée dans de l'encre *grasse* noircie, couvrons uniformément la surface; aspergeons d'un peu d'eau et frottons avec un morceau de drap : la gomme s'imbibe d'eau et repousse l'encre qui disparaît par frottement. Mais supposons qu'avant de procéder à cette opération, nous ayons par endroit gravé la pierre assez profondément pour supprimer la couche *préparée*; l'encre prendra sur la pierre. Noircissons au pinceau; aspergeons d'eau et frottons avec le drap : nous enlevons l'encre, *excepté aux points de la pierre qui ont été gravés.*

La gravure n'agit donc pas ici comme donnant des sillons qui retiennent l'encre *mécaniquement.* Elle met à nu une couche de pierre capable de retenir l'encre en vertu de ses propriétés *physico-chimiques.* Le graveur sur pierre ne doit donner à ses tailles que juste la profondeur nécessaire à supprimer la couche *préparée;* des sillons trop profonds sont plutôt nuisibles puisque le rouleau risque de ne pas encrer. L'imprimeur n'a pas à pratiquer l'essuyage, puisque l'encre

est non pas bourrée dans la taille ni maintenue par le bord du sillon, mais simplement appliquée à plat.

Les corrections consistent à empêcher les fausses tailles de retenir l'encre; il suffit de les *repréparer* avec de l'eau gommée et acidulée appliquée au pinceau.

Pour que le travail du graveur soit plus commode, au début de l'opération, la surface préparée est couverte d'eau gommée contenant en suspension du noir de fumée et de la sanguine; on emploie pour cela une brosse douce.

408. **Presse lithographique.**

1° — Rouleaux. Table a couleur.

A chaque instant nous parlons d'*encrage au rouleau.*

La figure représente deux formes usuelles.

Le grand rouleau est en bois (de 10 cm. de diamètre sur 30 de

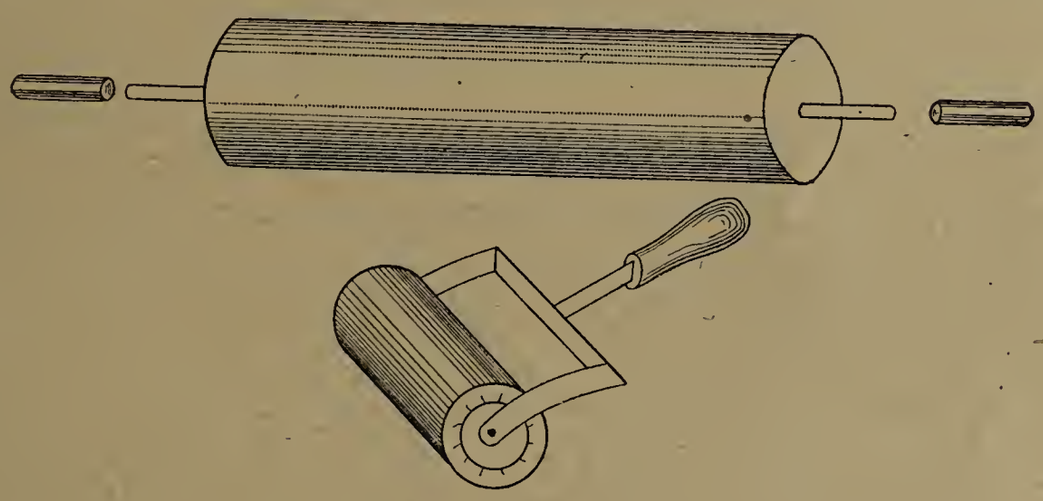


Fig. 265.

longueur, par exemple), terminé par deux axes en bois dur recouverts de gaines en cuir qu'on prend dans la main et qui servent de coussinets (*poignées*). Le bois du rouleau est recouvert de molleton, puis de peau de veau (couture en dedans). Le grain du cuir est plus ou moins gros.

Le rouleau pour de petits travaux est représenté en bas de la figure; il est construit de même.

Le rouleau ne doit servir qu'après avoir été imprégné de vernis pendant quelques jours; il doit être maintenu très propre, gratté après l'usage et lavé à l'essence de térébenthine.

La *table à couleur* est en marbre poli ou en pierre lithographique poncée et huilée. On étend l'encre sur la table avec le rouleau. Pour encrer la pierre, on commence par encrer le rouleau sur le marbre, puis on le roule sur la pierre : c'est une opération difficile qui exige beaucoup d'habitude.

2° — Presse lithographique.

Je ne décrirai que la plus simple.

La figure en représente schématiquement les pièces.

La pierre repose sur un chariot horizontal AA qu'on tire au moyen d'une sangle et d'un treuil sur lequel est fixé un moulinet; il est ramené en arrière par une corde tirée par un poids et passant sur une poulie.

Le papier est repéré sur la pierre, puis recouvert d'un châssis C fixé au chariot par des charnières et garni d'un cuir graissé à sa face supérieure.

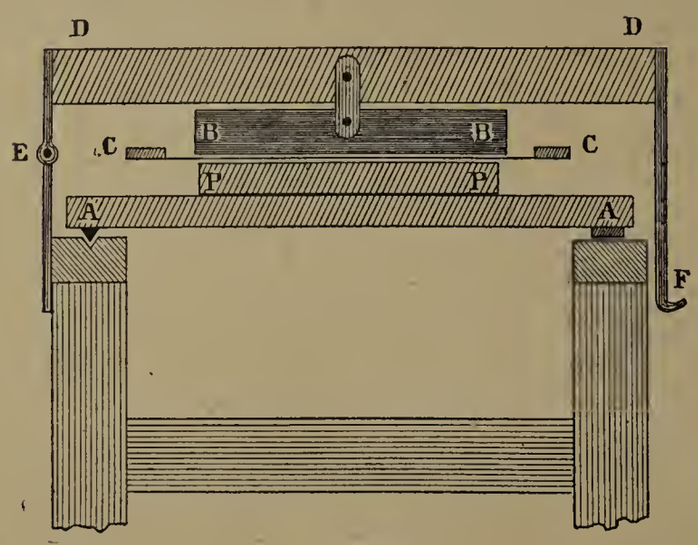


Fig. 266.

La pression est due à un *râteau* BB; c'est une pièce de poirier, dressée en double biseau, arrondie au papier de verre et graissée. Le râteau est fixé à une traverse DD, seulement par son milieu, de manière que la pression soit bien égale lorsque la traverse, rabattue autour de la charnière E, est tirée vers le bas par le moyen d'une pédale et d'un ressort (non représentés). Le ressort s'attache en F.

L'imprimeur passe sur la pierre une éponge humide, encre, pose la feuille de papier qu'il repère. Il abaisse le châssis, puis la traverse; le crochet F est ancré dans une boucle reliée à la pédale. L'imprimeur agit avec son pied droit sur la pédale, et saisit le moulinet qu'il tourne. Pendant qu'il amène le chariot au bout de sa course, l'impression s'effectue. Il abandonne alors la pédale et le moulinet, relève la traverse : le chariot est ramené par le contrepoids à sa position initiale.

La presse lithographique est étudiée pour une impression à plat, n'exigeant qu'une pression modérée.

409. **Lithographie en couleurs (chromos).**

1° — Les chromos sont obtenues en tirant successivement chaque couleur au moyen d'une pierre spéciale; le papier passe ordinairement de 5 à 10 fois (même pour des étiquettes) et jusqu'à 18 fois sous la presse.

L'artiste fournit une aquarelle; on en décalque un *trait* reproduisant les contours, les taches de couleurs et les modelés. On reporte ce *trait* sur autant de pierres qu'on veut mettre de couleurs : on use pour cela d'une encre peu adhérente qui partira d'elle-même sous l'action de l'eau acidulée quand on *préparera* la pierre.

C'est alors qu'intervient le travail du *chromiste*. Celui-ci doit connaître les réactions des couleurs posées les unes à côté des autres (*contrastes*) et les unes sur les autres; si à grand'peine nous pouvons expliquer

scientifiquement le résultat, le chromiste s'en remet à son expérience.

2° — Le chromiste couvre d'encre grasse lithographique (noire, mais peu importe) la partie de la pierre qu'il juge devoir remplir de chaque couleur; ces régions peuvent empiéter les unes sur les autres. Si la superposition des couleurs équivalait à leur mélange au sens du § 211, l'ordre d'impression des couleurs n'interviendrait pas. L'expérience montre qu'il n'est pas indifférent. Les résultats ne sont pas les mêmes quand on le modifie; il varie suivant l'artiste.

Voici un ordre possible pour 10 couleurs : jaune, vermillon, chair, bleu pâle, bleu foncé, rose, bistre clair, gris clair, gris foncé, bistre foncé.

En voici un autre pour 12 couleurs : bronze, bronze argent, bleu foncé, bleu clair, jaune, vert, chair, rose, rouge, teinte neutre, brun, noir.

Ils n'ont à peu près de commun que la marche vers les tons foncés.

Pour fixer les idées, les anciennes boîtes d'allumettes portaient une vignette tirée en jaune, chair, rouge, bleu, bistre foncé; parfois même on en ramenait le nombre à 4, en supprimant le bistre : le bleu faisait les contours (traits de force). Avec 6 couleurs (jaune, chair, rouge, bleu, bistre foncé, gris), on obtient une illusion de gamme complète.

Pour les dégradés, on use de la superposition des teintes plates de diverses couleurs; pour les chairs, on préfère le pointillé. On l'obtient à la plume dans les travaux soignés, ou par des procédés plus rapides; ils consistent à appliquer sur la pierre une surface grenue chargée d'encre grasse et qu'on appuie plus ou moins.

La chromolithographie peut être exécutée d'après les mêmes principes avec des crayons lithographiques sur des pierres grainées.

3° — Les couleurs d'impression sont comme le noir des vernis (huile de lin rendue siccative par chauffage en présence d'une matière oxydante) auxquels on mélange des couleurs finement broyées.

La grande difficulté de l'impression réside dans le repérage. La feuille de papier doit passer 10, 12 fois... sous la presse; elle doit occuper sur chaque pierre une position exactement déterminée si l'on veut éviter que les couleurs ne débordent indûment les unes par rapport aux autres (*bavures et surcharges*). On utilise parfois deux ou quatre trous d'aiguille préalablement percés dans la feuille et qu'on enfile dans des aiguilles verticales fixées sur deux ou quatre coulisses mobiles le long d'un châssis. Le châssis est parallèle à la surface supérieure de la pierre qu'il encadre; les aiguilles sont donc normales à cette surface. Le repérage consiste à déplacer les aiguilles sur le châssis jusqu'à ce que la couleur tombe à sa place, ce qu'on vérifie par quelques essais.

Parfois on utilise du papier perforé de trous circulaires en deux angles opposés; les aiguilles du châssis sont remplacées par des cônes. La mise en place de la feuille devient plus rapide.

Le papier qui sert à la chromolithographie, ne peut être mouillé, car le mouillage dilate le papier. Il est généralement *couché* (c'est-à-dire

recouvert d'une couche de colle dans laquelle est incorporée une poudre blanche inerte, puis satiné.

410. Décalcomanie.

La décalcomanie est devenue d'importance considérable à cause de son emploi dans la décoration céramique. Elle ne diffère de la chromolithographie que par des détails intéressants.

Le papier doit être non encollé dans la pâte. Il est recouvert d'une couche de colle d'amidon, de gélatine et de gomme arabique, couche sur laquelle on imprime; la couche colorée n'atteint donc pas le papier et peut aisément s'en détacher par simple mouillage.

Comme l'image doit être reportée sur l'objet à décorer (d'où un retournement), le dessin est à l'endroit sur la pierre (d'où le nom de *méta* chromotypie donné au procédé). De plus le tirage des couleurs doit se faire dans l'ordre inverse de l'habituel : les tons plats se tirent les derniers ; la dernière planche de force se tire la première.

Pour transporter l'image, on la recouvre de vernis qui assure l'adhérence, on l'applique, on mouille au dos : le papier se détache. On enlève l'enduit gommeux avec une éponge.

411. Diaphanie.

Je signale ce procédé pour fixer les idées sur la cause des colorations dans la chromolithographie (§ 217). On est tellement habitué à croire que la coloration vient d'une réflexion qu'on imagine aisément les couleurs comme opaques.

Or, le vernis rend transparentes les images chromolithographiques ordinaires et permet par collage sur le verre d'obtenir des vitraux à bon marché : preuve que les couleurs ne sont pas opaques et que la coloration est due à l'absorption par transmission.

Il va de soi que le choix des couleurs a une importance notable, les poudres étant plus ou moins transparentes. D'autre part, l'ordre d'impression n'intervient plus sensiblement, pas plus que n'intervient sur la composition de la lumière transmise l'ordre dans lequel on superpose des verres colorés.

On colle les *diaphanies* sur verre au moyen d'essence de térébenthine ou de vernis à l'alcool.

Conformément au § 216, le vernis supprime en parties les réflexions intérieures, ce qui revient à diminuer l'épaisseur des couches colorées ; la valeur des tons est donc notablement diminuée. On est amené à tirer plusieurs fois la même couleur pour augmenter l'épaisseur.

412. Grandissement ou réduction au moyen du caoutchouc.

On tire à l'encre de report une épreuve d'un dessin sur une feuille circulaire de caoutchouc qui s'imprime comme du papier.

Pour agrandir la feuille est placée au centre d'un cadre rectangulaire ABC. Elle est attachée par une centaine de fils radiaux qui passent

dans des trous percés dans le cadre et s'enroulent sur quatre tiges cylindriques EF, GH,... qu'il est possible de faire tourner simultanément du même angle. Par ce moyen on raccourcit tous les fils de la même longueur; on transforme donc un cercle de rayon R en un cercle de rayon $R + r$.

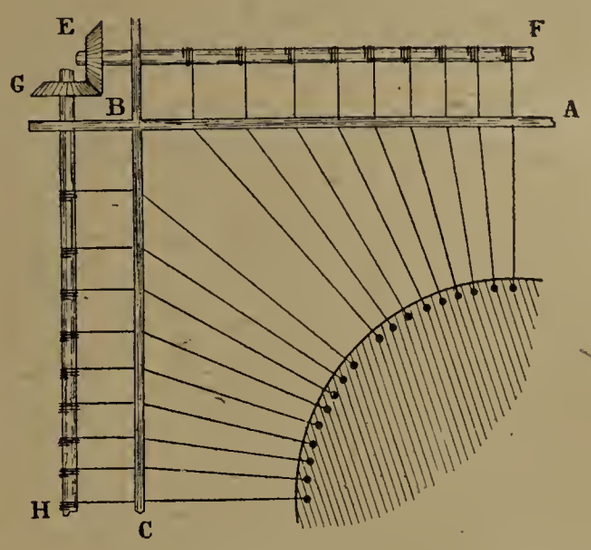


Fig. 267.

S'il s'agit d'une réduction, l'épreuve est tirée sur le caoutchouc dilaté; on le laisse ensuite revenir à une superficie moindre.

Comme il serait très difficile d'obtenir exactement le même allongement sur tous les fils, ils sont attachés au caoutchouc par des agrafes à vis (non représentées) qui permettent un réglage très exact une fois la déformation d'ensemble obtenue.

Lithographie sur zinc.

413. Zincographie.

Parmi les métaux, le zinc possède à un degré éminent les propriétés caractéristiques de la pierre calcaire; sec il fixe les encres grasses; il se mouille suffisamment et ne sèche pas trop vite. Employé sous forme de feuilles de 0,5 à 1 millimètre, il est moins cher, moins lourd, moins fragile, moins encombrant que la pierre.

On donne à la surface un état spécial en l'usant convenablement. La planche, fixée sur une table, est dressée et poncée. Suivant l'usage à laquelle on la destine, elle est polie jusqu'à l'emploi d'émeri d'un certain numéro; on ne va jamais jusqu'au poli spéculaire qui retient mal l'eau. La surface est lavée dans une solution alcaline qui dissout l'oxyde et avec de l'eau très faiblement acidulée; elle est enfin séchée.

L'écriture et les dessins s'exécutent sur le zinc séché comme sur la pierre; comme il fixe les corps gras mieux encore que la pierre, il faut éviter de le graisser. Le dessin fini, on *prépare* la surface avec un mélange de 1 000 centimètres cubes de décoction concentrée de noix de galle, obtenue par ébullition prolongée de 1 500 centimètres cubes d'eau et de 100 grammes de noix dans laquelle on dissout 20 grammes de gomme et 10 d'acide nitrique. L'acide gallique s'unit au zinc et le protège contre l'oxydation rapide. Après quelques minutes, on lave, on sèche. On enduit d'une solution de gomme arabique qu'on lave après quelques minutes. La planche séchée est prête pour l'impression.

L'impression s'effectue comme avec la pierre. Avant d'encrer, on mouille la planche à l'aide d'une éponge fine imprégnée d'eau rendue

visqueuse par un peu de dextrine. On passe alors le rouleau : l'encre ne s'attache qu'aux parties du zinc qui ont subi l'action du corps gras; on reproduit donc le dessin.

414. Phénomènes d'adhérence.

1° — On ne doit pas considérer comme exceptionnelle l'adhérence de l'eau et des matières grasses pour le calcaire ou les métaux. Elle fait partie d'un ensemble de phénomènes fort peu et fort mal étudiés, parce que, mettant la charrue devant les bœufs, on construit toujours des théories générales avant seulement de regarder les phénomènes.

Voici quelques faits signalés par Margot.

Un crayon d'aluminium laisse sur le verre et sur toutes les matières à base de silice (le quartz en particulier) des traces qu'aucun frottement, ni lavage ne font disparaître. Si le verre est humecté ou couvert de buée, les traits apparaissent pour une pression plus faible. Le verre doit être propre et *surtout privé de graisse.*

Le dessin se fait commodément à l'aide d'une petite meule d'aluminium, fixés à une transmission flexible (meule de dentiste). Le trait prend un éclat métallique irréprochable; il est absolument opaque. En traitant le dessin par l'acide chlorhydrique ou la potasse caustique en solution, on enlève le métal : *mais le dessin reste* comme si le verre avait été corrodé par l'aluminium.

2° — Le magnésium en crayon a une action encore plus énergique sur le verre et la porcelaine, surtout si la surface est légèrement humide. Malheureusement le dessin disparaît vite par oxydation du magnésium.

Le cadmium et le zinc adhèrent fortement au verre, le dernier moins facilement. Mais l'interposition de l'eau est un obstacle absolu à la prise du métal : il faut une surface absolument sèche.

Les expériences réussissent avec les trois premiers métaux sur le corindon (alumine cristallisée), la topaze, le rubis, l'émeraude, le quartz naturellement. Elle ne réussit pas sur le diamant : d'où un procédé pour le distinguer du strass.

415. Procédé au bitume de Judée.

Le procédé est basé sur la propriété du bitume de Judée de devenir insoluble dans l'essence de térébenthine (§ 381) quand il est insolé, et de retenir les matières grasses et l'encre lithographique.

On part d'une plaque de zinc dressée, dégraissée, poncée, décapée à l'acide azotique étendu, enfin traitée par une dissolution de noix de galle dans l'eau. On lave, on sèche et on recouvre dans l'obscurité d'une couche de bitume dissous dans l'éther. On fait sécher et on insole sous le cliché à reproduire. Partout où la lumière passe, le bitume devient insoluble.

On développe à l'essence de térébenthine qui dissout le bitume non insolé. On lave; on traite par l'eau acidulée pour bien mouiller les

parties de la plaque qui n'ont pas retenu le bitume. On lave, on essuie; on tamponne à l'encre *grasse*; l'encre ne prend que sur les parties couvertes de bitume. On essuie, on nettoie avec un peu de benzine.

Il ne reste plus qu'à encrer à l'encre d'*impression* et à tirer.

Le cliché dont on part est un négatif renforcé. Les traits noirs du dessin original, transparents sur le négatif, correspondent sur le zinc au bitume conservé, par suite aux parties encrées et aux noirs de l'épreuve.

416. **Procédé au mercure.**

Je décris ce procédé pour montrer l'extrême variété des propriétés auxquelles on s'adresse.

On dessine sur une feuille de zinc avec le *crayon au mercure* suivant :

Biodure de mercure	Nitrate de mercure	Eau	Gomme arabique
100	10	20	15

Cette pâte est moulée par compression dans des tubes.

Le dessin apparaît en blanc brillant d'almagame sur le fond gris du zinc.

On encre à l'encre grasse avec un rouleau de gélatine; *les parties amalgamées repoussent l'encre qui prend sur le zinc nu et non préparé.* Le dessin apparaît en blanc d'amalgame sur fond noir d'encre.

En utilisant la galvanoplastie et un bain de sulfate ou de chlorure ferreux ammoniacal, on recouvre les parties amalgamées d'une couche de fer. L'encre sert de réserve.

On lave la planche à l'essence de térébenthine pour enlever l'encre. Nous avons donc un dessin en fer sur un fond de zinc. On attaque à l'acide nitrique en solution aqueuse à 4 p. 100 pour ronger la couche superficielle de zinc qui a subi l'action de l'encre grasse; on lave à grande eau; on prépare la surface à la noix de galle et à la gomme (§ 413) : *ces divers réactifs n'attaquent pas le fer.* On encre à l'encre grasse : elle ne prend que sur le fer, c'est-à-dire sur les traits du dessin; elle est repoussée par le zinc préparé. Il ne reste plus qu'à encrer avec de l'encre d'impression et à tirer sur une presse lithographique.

Pour obtenir la gravure photographiquement, on combine cè qui précède avec ce que nous avons dit au § 381.

Lithographie sur gélatine et corps similaires.

417. **Phototypie.**

1° — Cette méthode porte les noms les plus divers (héliotypie, phototypie, photocollographie, etc., etc.).

Il s'agit de transformer une couche de gélatine de manière que

certaines parties retiennent l'encre et que les autres ne la retiennent pas : le problème se ramène à celui-ci : faire en sorte que certaines parties ne se mouillent pas et que les autres se mouillent, l'eau repoussant l'encre et les matières grasses.

Or la gélatine bichromatée insolée devient insoluble dans l'eau chaude, et incapable de s'imbiber d'eau froide (§ 312).

Sans insister pour l'instant sur le moyen de la stabiliser sur son support (qui est une glace épaisse), supposons obtenue une couche de gélatine bichromatée séchée dans l'obscurité, par conséquent *sensible*. Insolons-la sous un négatif. Lavons *à froid* pour chasser le bichromate. Nous obtenons une couche de gélatine dont les portions insolées ne retiennent pas l'eau, par suite fixent l'encre grasse.

Passons au détail.

2° — Pour stabiliser la couche sur son support (ordinairement une dalle de glace), coulons sur la glace une solution d'albumine et de gélatine bichromatée; séchons à 45°. Insolons *à travers la glace*. La gélatine qui est en contact avec la glace est insolubilisée et y adhère fortement; tandis que celle qui est opposée à la glace et qui ne reçoit la lumière qu'à travers le bichromate reste plus ou moins soluble : peu importe du reste.

Cette première couche est le support auquel se fixera la couche servant à la reproduction.

On lave à froid pour chasser l'excès de bichromate, à 50° pour dissoudre la partie soluble. La dalle est prête à recevoir la seconde couche.

Celle-ci est étendue et desséchée vers 55°. On insole de 2 à 5 minutes suivant l'intensité de la lumière. On lave à froid jusqu'à supprimer tout le bichromate. On passe à l'alun pour tanner la gélatine et on laisse sécher. La première partie des opérations est terminée. En définitive elle est identique à celle du § 312.

Avant d'encrer, on mouille; les parties insolées refusent l'eau; les autres gonflent. On passe alors le rouleau à encre grasse : l'encre adhère aux parties sèches. Il ne faut pas que les reliefs soient trop prononcés, l'encrage deviendrait difficile.

La couche est alors prête pour le tirage. Pour éviter d'avoir à mouiller entre chaque épreuve, on traite par une solution de glycérine dans l'eau; la glycérine, très hygrométrique, maintient assez longtemps l'humidité.

418. Autocopie.

On dispose d'un très grand nombre de procédés de reproduction. Il est nécessaire d'en dire quelques mots, ne serait-ce que pour les bien distinguer de la lithographie et des procédés similaires, et parce qu'on les emploie dans les laboratoires.

1° — Polycopie.

On écrit sur une feuille de papier glacé avec une encre concentrée

d'aniline. On applique la feuille sur une plaque formée de gélatine, de glycérine et d'une poudre inerte (talc, sulfate de baryte, kaolin) contenue dans une cuvette rectangulaire en tôle étamée. On presse avec la main. Après quelques minutes de contact on enlève la feuille. On constate que l'écriture l'a quittée.

Pour obtenir une copie, on étend une feuille de papier blanc, on frotte avec la main et on retire. Comme l'encre est épaisse et très colorante, on peut obtenir de 30 à 40 épreuves; les dernières sont naturellement très pâles, puisqu'il est impossible d'encrer à nouveau entre chaque épreuve.

Comme on le voit, le procédé s'appuie uniquement sur le fait que la gélatine retient l'encre.

En refondant la gélatine dans sa cuvette, elle est prête pour un nouvel emploi.

Au lieu d'une plaque de gélatine, on utilise des feuilles de parchemin gélatiné qui ne servent qu'une fois.

2° — Autocopiste noir.

C'est la méthode précédente avec encrage, par suite obtention d'un grand nombre d'épreuves.

La pierre ou le zinc sont remplacés par une feuille de parchemin convenablement préparée et jouissant d'une grande affinité pour l'eau, mais d'une affinité plus grande pour les matières *grasses*.

On la mouille et on la tend au moyen d'un cadre de bois contre une planchette avec interposition d'un feutre mouillé.

On écrit sur du papier quelconque avec de l'encre *à report*; on applique l'écriture sur le parchemin et on exerce une pression pour que l'encre entre dans le parchemin. On retire le papier. On encre au rouleau avec de l'encre *typographique ordinaire* et on imprime sur du papier blanc en pressant avec un râteau ou à la main. De temps en temps on mouille de manière que l'encre typographique ne prenne que sur l'écriture.

On peut tirer jusqu'à 200 exemplaires.

Le procédé ne réussit qu'en raison de la grande affinité pour l'encre grasse et de l'affinité bien moindre pour l'encre typographiqne. La première repousse l'eau; la seconde est repoussée par l'eau.

419. **Limotypie, multigraphie.**

Le procédé est purement mécanique.

On tend une feuille de papier baudruche sur une plaque de métal finement gravée, dans le genre d'une lime; on écrit le texte avec un poinçon qui fait un très grand nombre de petits trous. Cette sorte de tamis obtenu, on l'applique contre le papier sur lequel on veut imprimer, et on passe au rouleau chargé d'encre.

L'encre filtre par les trous et donne une épreuve.

La même feuille de papier baudruche peut fournir 2 000 épreuves.

APPENDICES

APPENDICE I

FABRICATION DU PAPIER

Le papier a dans ce volume une telle importance que je suis obligé de rappeler les principes de sa fabrication, très simples si l'on se borne aux questions fondamentales.

1. Papier de chiffon à la main.

Voici la manière de fabriquer le papier *à la main*, antérieure à l'emploi des machines et des succédanés du chiffon; je résume la description donnée par l'*Encyclopédie* de Diderot. Elle fixera les idées du lecteur.

1° — Les chiffons (*de lin ou de chanvre*) sont *délissés*, c'est-à-dire triés, séparés en diverses sortes; on met à part les coutures, les boutons.... L'opération est effectuée au moyen de crochets et de serpettes solidement fixés sur un banc, avec lesquels l'ouvrière découd et sépare.

Les chiffons sont lessivés (la lessive est une solution de carbonates alcalins), puis mis tout mouillés dans des *pourissoirs* où ils fermentent deux à trois mois. Les fibres sont ainsi isolées les unes des autres et plus faciles à réduire en ce qu'on appelle la *pâte à papier*.

Les chiffons, effilochés d'abord contre des lames tranchantes, sont placés dans des mortiers de chêne dont le fond est garni d'une plaque de fer (*piles*), où ils sont battus par des marteaux pilons (*maillets*). L'extrémité inférieure des pilons est constituée par des tiges d'acier maintenues les unes contre les autres par une frette et dont les bouts sont rendus tranchants par un biseau.

Les pilons, actionnés par une came (voir mon Cours de *Mécanique*), réduisent les chiffons en une sorte de bouillie appelée *pâte à papier*. La pâte est desséchée et peut être conservée indéfiniment : on la délaie à nouveau pour l'employer.

2° — Avant de passer à la fabrication du papier à partir de la pâte, précisons sa nature. Le papier est un *feutre* comme les *chapeaux de feutre*. Les poils, fibres, en général les corps de la nature animale ou végétale dont la longueur est grande par rapport au diamètre, forment

un tissu résistant *par simple agitation et compression*. Par exemple, pour obtenir les chapeaux de feutre, on prend des poils de lapin, de chameau,... auxquels on associe de la laine dont les propriétés feutrantes sont particulières. Les poils humectés forment un feutre quand on les roule entre deux étoffes et quand ensuite on comprime le tissu obtenu (*foulage*).

La *pâte à papier* n'est pas une solution homogène; elle est constituée par des fibres insolubles en suspension dans l'eau. Il s'agit de la transformer en un feutre.

3° — On emploie pour cela des tamis rectangulaires ou *formes* (d'où le nom de *papier à la forme*); les dimensions des formes étaient fixées par des arrêts du Conseil. Ce sont des *châssis*, sortes de boîtes plates rectangulaires sans couvercle ni fond. Elles sont partagées en longs casiers par une série de planchettes de sapin, parallèles au petit côté du rectangle, équidistantes, disposées à 3 centimètres les unes des autres. Supposons le châssis horizontal; le plat des planchettes est vertical. Leur long côté supérieur est taillé en double biseau tranchant; ces biseaux forment un plan horizontal. Sur les biseaux reposent, à angle droit, des fils de laiton horizontaux, tendus, dont l'équidistance est environ 1 mm. 2. Les fils sont maintenus à l'écartement convenable par des chaînettes de fil de laiton fixées aux biseaux des planchettes.

Au reste le lecteur n'a qu'à regarder par transparence une page d'un vieux livre ou du papier à filtre pour reconnaître les traces des biseaux (*verjures*) et des fils.

Nous obtenons ainsi une sorte de tamis *renversé* qui dans la situation d'emploi est horizontal, et présente à sa partie supérieure une série de fils parallèles, équidistants, maintenus en dessous par les biseaux des planchettes. Pour limiter la partie utile du tamis, on pose dessus un cadre (*couverte*) qui s'emboîte comme un cadre sur un tableau. Tenant le cadre des deux mains, l'ouvrier applique la forme contre lui, en poussant par-dessous avec les doigts.

Les anciens règlements exigeaient que le papier fût marqué d'un *aigle*, d'une *grappe de raisin*, d'un *serpent*, du *nom de Jésus*, d'une *couronne*, suivant les dimensions et le poids qu'il devait légalement avoir. Pour obtenir ces marques ou *filigranes* (qui devaient obligatoirement se trouver au milieu de la feuille), aux fils de laiton formant la trame du tamis, on soudait une figure en fils représentant la marque.

Les noms seuls se sont conservés après l'introduction du système métrique remplaçant les anciennes mesures en pouces et en lignes. Par exemple le grand-jésus qui avait 26 pouces sur 19 pouces 6 lignes, c'est-à-dire 70×55 centimètres environ, est devenu notre jésus (70×55). Un ouvrage in-18 jésus est celui pour lequel la feuille est pliée en 18 morceaux, 6 fois dans un sens, 3 fois dans l'autre. Le lecteur reconnaît le format (12×18 centimètres environ) des romans à 3 fr. 50.

Le présent ouvrage (25×16 centimètres environ) est *in-octavo raisin* :

c'est dire que la feuille 50 × 65 est pliée en 8 morceaux (2 dans un sens, 4 dans l'autre); chaque feuille fournit 16 pages *recto* et *verso*.

Aucun règlement ne force plus à donner aux feuilles des dimensions particulières.

4° — Pour ouvrer une feuille de papier, on délaie de la pâte desséchée dans de grandes cuves pleines d'eau tiède très propre. On brasse de manière à obtenir la répartition uniforme des fibres. L'ouvrier plonge dans la cuve la forme recouverte de son cadre; il rend le tamis bien horizontal à une dizaine de centimètres au-dessous de la surface de l'eau. *Il relève lentement la forme en la maintenant horizontale.* Il prend donc sur la forme, comme sur un filet de pêcheur, les fibres qui flottaient dans l'eau. L'eau s'écoule à travers le tamis. L'épaisseur de la feuille est proportionnelle à la quantité de fibres que contient l'unité de volume d'eau, et à la profondeur à laquelle la forme est immergée au moment où l'on commence à la relever.

Les fibres se feutrent sur le tamis à mesure que l'eau s'écoule à travers la forme; l'ouvrier favorise le feutrage par des secousses horizontales *dans les deux sens*; ainsi l'enchevêtrement des fibres a lieu dans toutes les directions.

Telle est la fabrication d'une feuille de papier : il est difficile d'imaginer quelque chose de plus simple. On conçoit que l'épaisseur soit moindre là où se trouvent les biseaux et les fils qui apparaissent en clair.

La feuille devient immédiatement assez solide pour qu'on puisse, une fois la couverte enlevée, renverser la forme sur un morceau d'étoffe de laine (*feutre*). La feuille de papier se détache du tamis. On superpose ainsi une série de feuilles de papier et de feutres (250 ou 500, *demi-rame* ou *rame*); on transporte la pile sous une presse qui en exprime l'eau et solidifie le feutrage. Au sortir de la presse, on empile à nouveau les feuilles de papier en supprimant les feutres; on fait repasser la pile sous la presse. Après quoi on étend les feuilles comme du linge pour les sécher complètement.

Lorsque le papier est bien sec, on le colle. Pour cela on plonge plusieurs feuilles ensemble dans une chaudière de cuivre contenant une solution tiède de gélatine dans l'eau, solution à laquelle on ajoute de l'alun. Le papier collé est pressé et séché. Le papier non collé est *buvard*.

2. Machine à fabriquer le papier.

Le lecteur comprendra maintenant en quelques mots l'essentiel de la fabrication à la machine : c'est purement et simplement l'obtention mécanique continue des opérations qu'on effectuait à la main. Certes les machines sont compliquées, mais leurs gestes élémentaires sont très simples.

1° — La *forme* est remplacée par une toile métallique *sans fin* qui

peut avoir 1 m. 50 de largeur utile. Elle est entraînée par des rouleaux, elle s'appuie sur des *rouleaux presses* dont nous verrons le rôle, elle est tendue par d'autres rouleaux. Dans la partie horizontale de sa course, des bielles lui imposent (grâce à son élasticité) un mouvement alternatif rapide, de petite amplitude, dans son plan (horizontal), normalement à sa longueur; cette oscillation trépidante, qui remplace l'agitation que l'ouvrier donnait à la *forme*, aide au feutrage. Mais n'ayant lieu que dans un sens, le papier est moins uniforme de propriétés dans toutes les directions. D'où résulte que la résistance à la traction est plus grande dans le sens du mouvement sans fin de la toile (sens longitudinal) que dans le sens transversal : preuve que les fibres se rangent en plus grand nombre dans le sens longitudinal. La vitesse du mouvement sans fin est déterminée par le temps nécessaire au feutrage (10 à 20 secondes), et par la longueur de la toile sur laquelle il s'opère (2 m. 50 environ).

La pâte, convenablement étendue d'eau et brassée (le feutrage est d'autant plus parfait qu'elle est plus étendue d'eau) est uniformément répandue sur la toile au début de sa course horizontale. L'eau s'écoule peu à peu, les trépidations transversales égalisent l'épaisseur et facilitent le feutrage. La dessiccation est activée par le passage de la toile au-dessus d'une boîte rectangulaire où l'on produit un vide partiel. Bref, la toile entraîne d'une manière continue une feuille de papier qui se refait indéfiniment à un bout.

Déjà privée d'eau par l'agitation et l'aspiration, la feuille est appliquée sous un rouleau égoutteur en toile métallique, puis entre deux cylindres de cuivre garnis de feutre qui lui donnent par pression une consistance suffisante. La première partie de l'opération est terminée.

2° — La feuille quitte la toile sans fin qui revient par-dessous et, dans sa course de retour, passe sous des rouleaux qui la guident et la tendent.

La feuille est alors prise par un premier feutre F sans fin qui, comme la toile métallique, est *au-dessous d'elle*; il la conduit entre des cylindres compresseurs de cuivre. Pendant ce temps elle repose d'un côté sur le feutre, de l'autre, sur un cylindre nu. Elle sort de ce laminoir avec un *endroit* et un *envers*. Elle quitte alors le feutre F, pour être prise par un feutre F′ qui est *au-dessus* d'elle : il la conduit entre deux nouveaux cylindres compresseurs qui égalisent les deux côtés de la feuille.

Il ne reste plus qu'à sécher et satiner le papier. Pour cela un feutre sans fin l'applique contre des cylindres de cuivre ou de fonte chauffés intérieurement à la vapeur. Il passe dans des laminoirs qui l'égalisent et suppriment les rugosités de sa surface. Enfin il est reçu par des dévidoirs qui l'emmagasinent en rouleaux dont la longueur peut être aussi grande qu'on le désire.

Le lecteur retrouve dans la fabrication mécanique la série des opérations de la fabrication à la main.

Pour le tirage des journaux à la presse rotative, le papier est laissé en rouleaux; il est seulement convenablement rogné latéralement. Pour le tirage à la presse ordinaire, les rouleaux sont débités en feuilles de longueur convenable.

3. Blanchiment de la pâte.

Pour ne pas couper ma description, j'ai supposé qu'on employait des chiffons assez propres pour qu'un lessivage ordinaire avec un carbonate alcalin leur rendît une blancheur suffisante. C'était du reste ainsi qu'on procédait avant que Berthollet découvrît les procédés du blanchiment chimique.

Aujourd'hui, surtout avec l'emploi des succédanés de chiffon (§ 6), la pâte doit être chimiquement blanchie. On utilise pour cela le chlore gazeux ou le chlorure de chaux.

1° — Pour blanchir au chlore, la pâte humide est étalée en couche mince sur des tablettes, disposées dans des chambres de manière à faire chicanes. Le chlore est amené par la partie supérieure de la chambre, lentement pour que l'échauffement qui résulte de la réaction, soit faible. L'opération dure vingt-quatre heures. Pour blanchir une tonne de pâte, on utilise le chlore fourni par 60 kilogrammes de bioxyde de manganèse et 100 kilogrammes d'acide chlorhydrique commercial.

Le chlorure de chaux est le produit de l'action du chlore sur la chaux. C'est un mélange d'hypochlorite de calcium $(ClO)^2Ca$ et de chlorure de calcium $CaCl^2$, avec de la chaux hydratée en excès. L'hypochlorite agit exactement comme le chlore; la valeur commerciale du chlorure de chaux est proportionnelle à la quantité d'hypochlorite contenue.

On commence par dissoudre le chlorure de chaux pour éliminer les impuretés insolubles; on décante de manière à obtenir une solution limpide. Pour le blanchiment des pâtes, on ajoute à 100 kilogrammes de pâte supposée sèche, 1 500 litres de la solution contenant environ 40 kilogrammes de chlorure de chaux. L'opération se fait dans des caisses plates présentant une grande surface libre, permettant ainsi l'action rapide de l'anhydride carbonique de l'air. Cet acide attaque l'hypochlorite, met l'acide hypochloreux en liberté et donne du carbonate de calcium. L'acide hypochloreux se décompose et agit par ses éléments oxygène et chlore; le dernier décompose l'eau en fournissant de l'acide chlorhydrique et de l'oxygène : en définitive, le blanchiment est effectué par oxydation. La petite quantité d'anhydride carbonique contenue par l'air explique la lenteur de l'opération. Pour la hâter, on ajoute parfois un peu d'acide sulfurique ou d'acide chlorhydrique, il est préférable d'utiliser un courant de gaz carbonique.

2° — Le blanchiment doit être suivi d'un lavage à grande eau qui enlève le chlore en excès et les acides. Pour vérifier que le chlore a complètement disparu, on utilise le réactif obtenu en faisant bouillir 1 partie d'iodure de potassium, 2 de fécule de pomme de terre, 3 d'eau.

S'il reste du chlore, il met l'iode en liberté : le réactif se colore en bleu.

Pour économiser du temps, on emploie les *antichlores*. Le plus commun est le sulfite de soude : sous l'action du chlore, il donne du sulfate de soude et de l'acide chlorhydrique. Le sulfite de chaux donne du sulfate de chaux qui reste dans la pâte et sert de *charge*. On utilise également les sulfures alcalins, l'ammoniaque....

4. Encollage du papier.

Nous avons vu l'encollage se faire à la main dans une solution de gélatine additionnée d'alun. Le papier ainsi encollé ne l'est que superficiellement : si l'on gratte, il devient *buvard*. On connaît depuis toujours le moyen de lui permettre de supporter à nouveau l'écriture sans que l'encre flue et s'étende : on saupoudre de *sandaraque* (résine) la partie écorchée et l'on frotte avec un corps arrondi.

L'encollage *à la cuve* est une heureuse imitation de ce procédé due à Montgolfier. On amène la résine (colophane) à l'état de savon résineux en faisant agir dessus de la soude ou du carbonate de soude. Dans une solution étendue de ce savon, on ajoute de la fécule. On chauffe ; la fécule gonfle, épaissit le liquide et aide à maintenir le mélange homogène.

On verse cette colle résineuse sur la pâte à papier; on agite pour répartir uniformément. Enfin on ajoute de l'alun. La résine combinée à l'alumine de l'alun se fixe sur les fibres et les rend hydrofuges. Le papier, fabriqué comme nous avons dit, est encollé *dans la masse*; il ne devient pas *buvard* ou *brouillard* après grattage. D'autre part la fécule rapproche et agglutine les fibres du papier. On reconnaît les papiers contenant de la fécule à leur bleuissement sous l'action de l'iode. Le lecteur se rappellera le rôle de l'amidon dans l'apprêt du linge *empesé*.

5. Lissage, gaufrage du papier.

1° — *Lisser*, *glacer* le papier est l'opération par laquelle on supprime les rugosités superficielles qui proviennent de la toile métallique de la machine à fabriquer le papier, rugosités que le passage entre les cylindres compresseurs ne détruit pas absolument. On empile les feuilles de papier (quelquefois légèrement mouillées) entre des feuilles de zinc de quelques centimètres plus grandes. Quand on a formé un paquet (*jeu*) de 25 feuilles environ, on le fait passer et repasser entre les cylindres d'acier d'un laminoir. Parfois le jeu passe successivement entre les cylindres de laminoirs montés en tandem, dont on règle convenablement les écartements de manière que la pression croisse de l'un au suivant.

Le *satinage* est un glaçage *après tirage* destiné à détruire le foulage dû aux caractères typographiques.

2° — S'il est possible de supprimer les rugosités, il est évidemment possible d'en faire naître, c'est-à-dire de donner au papier le *grain* qui convient à l'emploi auquel on le destine.

Par exemple, dans ces derniers temps, la mode voulait que le papier à lettres imitât la toile. Le *gaufrage* s'obtient alors en utilisant des feuilles de zinc bien nettoyées sur lesquelles on colle une toile mince avec de la colle de riz additionnée d'un peu de glycérine. On opère comme pour le glaçage, mais en utilisant les feuilles de zinc entoilées.

On peut encore utiliser une *calandre* (laminoirs à plusieurs cylindres destinés à lisser et apprêter les tissus) dont un des cylindres est recouvert de toile. Pour le papier continu, on calandre avec une toile sans fin passant entre le cylindre et le papier. Mais ces procédés ne valent pas l'emploi de feuilles métalliques entoilées.

6. **Succédanés des chiffons.**

1° — Maintenant que le lecteur a bien compris ce qu'est le papier, à quel point sa fabrication est simple à partir des chiffons, il est loisible de compliquer le problème par l'hypothèse qu'on n'a pas de chiffons, ce qui est le cas général. Tout ce que nous avons dit de la fabrication *à partir de la pâte à papier* (eau contenant en suspension des fibres végétales) subsiste évidemment ; il s'agit d'obtenir cette pâte à partir de la paille, de l'alfa, du bois..., succédanés du chiffon de lin ou de chanvre.

Que le lecteur se rappelle d'abord comment on extrait du chanvre et du lin les fibres textiles qu'ils renferment. On a recours au *rouissage* : on laisse les tiges plongées un certain temps dans l'eau où elles pourrissent. L'isolement des fibres est l'œuvre du bacille *amylobacter* : il attaque le ciment qui agglutine les fibres ; il finirait à la longue par les attaquer elles-mêmes, d'où la nécessité de ne pas trop prolonger le rouissage.

Le *teillage* subdivise ensuite mécaniquement les faisceaux de fibres désagglutinées. La fabrication du papier à partir du chiffon est particulièrement simple, parce que pour obtenir la fibre textile, on a déjà effectué ces deux opérations qui doivent nécessairement se retrouver dans la fabrication de la pâte à partir de la paille, du bois,... : par un procédé quelconque, il faut désagglutiner les fibres, dissoudre le ciment qui les relie, enfin subdiviser les faisceaux, ce qui nécessite une opération chimique et une opération mécanique.

2° — Ceci posé, voici comment on obtient la pâte de papier à partir de la paille.

La paille, privée de tous corps étrangers, est triée ; on en écrase les nœuds entre des cylindres, on la hache en bouts de 3 centimètres, on la blute pour enlever les poussières, enfin on la ramollit dans l'eau chaude.

Pour séparer les fibres, ont fait agir une solution de soude caustique.

Elle est contenue dans une chaudière de fer close qu'on chauffe à la vapeur jusqu'à la température qui correspond à 4 atmosphères. Pour que l'agitation soit facile la chaudière est sphérique. On utilise environ 15 kilogrammes de soude caustique pour 100 de paille. Au bout de quatre à six heures l'opération est terminée.

La paille est alors réduite en une bouillie filamenteuse qu'on lave à l'eau acidulée et à l'eau pure. On broye la matière à l'aide de cylindres ou de marteaux-pilons, on blanchit; la pâte à papier est obtenue. Le rendement est de 40 p. 100.

L'alfa est une plante qui pousse en quantités considérables dans le Sud Tunisien (du côté de Sfax) et dans le Sud Oranais : on le traite à peu près comme la paille; le rendement est de 50 p. 100. Les fibres sont longues et souples; on les mélange avantageusement à celles beaucoup plus courtes de la paille.

3° — Le bois est employé en quantités énormes pour la fabrication du papier. On distingue la *pâte mécanique* de la *pâte chimique*.

La *pâte mécanique* est le résultat de la division du bois par l'effilochage contre des meules de grès. Ce n'est pas une véritable pâte à papier; elle n'en a ni la structure fibreuse ni les propriétés feutrantes. Elle se prête mal au blanchiment et conserve toujours plus ou moins la couleur du bois. Son principal avantage est son bas prix; on la mélange avec d'autres pâtes dans la proportion de 15 à 50 p. 100.

Elle augmente l'opacité du papier et reçoit bien l'encre d'impression.

Elle est très employée pour les journaux.

Le bois découpé par bûches de 30 centimètres de longueur et privé de son écorce, est appuyé contre la jante cylindrique d'une meule de grès, de manière que ses fibres soient parallèles à l'axe de rotation. La meule a 120 centimètres de diamètre, 40 centimètres d'épaisseur et tourne à raison de 3 tours à la seconde. Un courant d'eau empêche l'échauffement et entraîne les fibres obtenues.

Je laisse de côté le détail des appareils destinés à séparer les fibres régulières et à retravailler les éclats trop grossiers.

On utilise principalement le pin, le sapin, le tremble, le tilleul, le hêtre, le bouleau, le peuplier.

La *pâte chimique* de bois est obtenue à peu près comme celle de paille.

Le bois écorcé (généralement du pin) est réduit en copeaux ou en rondelles minces. Il est introduit dans la lessiveuse où agit sous pression la solution de soude caustique. Au sortir de la lessiveuse, il est convenablement lavé, puis désagrégé. Enfin la pâte est blanchie.

Je n'insiste pas sur les divers réactifs (bisulfites, oxydants,...) qui remplacent souvent la lessive alcaline. Il ne s'agit pour moi que de fixer les idées de mon lecteur.

Voici quelques chiffres pour fixer les idées du lecteur.

Il entre dans la fabrication du papier *de journal* 65 p. 100 de pâte de

bois, 25 p. 100 de pâte chimique, 15 p. 100 de vieux papiers sur lesquels la perte de fabrication est de 5 p. 100.

Avant la Guerre la pâte de bois coûtait 13 francs les 100 kilos; la pâte chimique en coûtait 24 et les vieux papiers 7. Les prix ont quadruplé pendant la Guerre.

4° — On cite toujours parmi les papiers extraordinaires ceux du Japon. Ils sont fabriqués avec l'écorce du *mûrier à papier*. Les tiges sont ramollies par l'eau bouillante. L'écorce est séparée du bois et, après des manipulations destinées à mettre à part la superficie colorée des parties intérieures blanches, l'écorce est traitée par une lessive de soude. Le reste comme plus haut : les opérations ne diffèrent pas en principe de celles que nous connaissons.

7. Papiers couchés.

Les papiers couchés, employés dès le début pour la chromo-lithographie, sont devenus d'une fabrication considérable depuis l'introduction des illustrations en typographie obtenues avec des réseaux (*similigravure*, § 400). La *couche* est constituée par une matière minérale, blanche, très fine, et par une matière colloïde agglutinante.

Le *blanc fixe* est du sulfate de baryte précipité; le *blanc satin* est un mélange d'alumine (13 p. 100) et de sulfate de chaux (83 p. 100). Le commerce vend ces matières en pâte contenant 20 p. 100 d'eau.

La matière colloïde est de la caséine ou de la gélatine.

Les formules sont complexes et dépendent du travail à réaliser. En voici une pour fixer les idées : caséine 8 à 10, blanc fixe 50, blanc satin 50, eau 35; on ajoute un peu de soude caustique et du carbonate de soude.

On étend la pâte au moyen de brosses sur le papier animé d'un mouvement continu.

Le papier couché se casse au pliage; il se détériore spontanément assez vite. Il est plus cher et plus lourd que le papier non couché.

Pour en finir avec les papiers couchés ou non couchés ordinaires, voici quelques renseignements sur les épaisseurs moyennes. Le papier à cigarettes a une épaisseur de l'ordre de 20 μ; un paquet de 150 feuilles bien pressé est épais d'environ 3 millimètres. Les papiers ordinaires pour les livres ont une épaisseur de 60 à 100 μ; il est facile de la mesurer en pressant le volume dans un étau, mesurant son épaisseur et divisant par le nombre de feuillets indiqué par la pagination.

8. Papier-filtre, filtration.

Filtrer un liquide c'est en supprimer (plus ou moins) les matières en suspension par le passage à travers un corps ou un système de corps formant un réseau plus ou moins serré. On filtre l'eau potable à travers du grès, de la porcelaine dégourdie, des éponges tassées, du sable, etc.... On filtre à travers de la toile, des tissus de laine (molleton, chausse

d'Hippocrate).... Il va de soi que la filtration ne supprime que les corps d'un certain volume; elle ne rend pas potable une eau qui ne l'est pas, à moins que les pores ne soient particulièrement serrés (filtres Pasteur); encore ne faut-il pas trop se fier au dithyrambe des catalogues.

Les chimistes et physiciens utilisent le papier pour la filtration.

Le papier à filtrer (dit *papier Joseph*) ne doit être ni collé ni blanchi aux chlorures. Ses fibres doivent être longues et bien feutrées; on le fabrique à la forme avec du chiffon de fil ou du *coton* brut (le *coton* est constitué par les poils qui enveloppent les graines d'un arbuste, le *cotonnier*; les fibres ont de 25 à 30 millimètres de longueur moyenne).

Quand il s'agit d'analyses précises, il est convenable de laver les filtres avec une solution d'acide chlorhydrique (1 d'acide, 2 d'eau), puis à grande eau. On peut ensuite les refaire sécher. On détermine le poids des cendres sur du papier de même fabrication; il ne doit pas dépasser 2 ou 3 millièmes du poids du papier.

Le *papier Berzélius* est du papier de chiffon blanc de qualité exceptionnelle; il est blanchi sur le pré.

9. **Cartons.**

La fabrication du carton diffère à peine de celle du papier; mais au lieu de partir d'une pâte neuve, on utilise une pâte formée de déchets et de mauvais papiers. On fait pourrir ces matières, on les effiloche; on obtient une pâte à laquelle on ajoute du kaolin, de l'ocre, de la craie pour faire du poids,..... de la gélatine, de l'amidon pour agglutiner.

On utilise cette pâte soit à la forme, soit avec des machines analogues aux machines à papier.

On n'obtient jamais par ce procédé que des cartons minces; les cartons épais résultent de la compression de cartons minces *encore humides* superposés. Le nombre des cartons ainsi collés varie suivant l'épaisseur à réaliser.

On obtient aussi les cartons épais par collage (à la colle d'amidon ou de farine) de papiers ou de cartons superposés. Les beaux cartons blancs (bristols) résultent du collage de feuilles de papier, en nombre parfois considérable (10 à 12), suivi d'une compression énergique et du passage au laminoir. Les cartons communs sont obtenus par collage de cartons minces.

Rien n'empêche de coller du papier blanc sur les faces d'un carton commun qui sert d'âme; la matière n'est belle que superficiellement.

La pâte de carton sert à mouler les objets en *carton pâte* ou en *papier mâché*. On utilise aussi pour cela la *pâte mécanique* de bois.

Fabrication des cartes a jouer.

Comme exemple de carton, signalons les *cartes à jouer*.

L'État fournit aux fabricants des feuilles de papier blanc *filigranés*; ils portent les lettres C I (contributions indirectes) à la place que chaque carte occupera. Le fabricant les triple d'épaisseur en collant successi-

vement sur leur dos une feuille de papier gris (pour rendre la carte opaque), et une feuille de papier de couleur qui forme le dos et s'appelle *tarot*.

L'encollage des feuilles se fait mécaniquement avec les rouleaux d'un laminoir qui étale de la colle d'amidon, absolument comme les rouleaux des presses à imprimer étalent l'encre.

On sèche, on imprime en typographie en couleur; on cylindre, on vernit. Il ne reste plus qu'à découper les cartes, arrondir les coins à l'emporte-pièce, et, si besoin, les dorer comme la tranche des livres.

APPENDICE II

SUR LA FRÉQUENCE DES LETTRES (POLICE DES FONDEURS)

A propos du télégraphe Morse et de l'alphabet Braille, la question de la fréquence relative des lettres s'est incidemment posée. Il est évidemment convenable de représenter par les signes les plus simples les lettres qui reviennent le plus fréquemment. On conçoit que, dès les premiers temps de l'imprimerie, les fondeurs de caractères aient établi ce qu'on appelle une *police*, c'est-à-dire aient déterminé dans quels rapports ils doivent fondre les diverses lettres.

Avant d'indiquer la *police* ordinairement suivie en France, quelques remarques sont nécessaires.

Tout d'abord l'expérience montre que les lettres commençant les mots ne sont pas dans le même ordre de fréquence que les lettres considérées indifféremment au début ou dans le corps du mot.

Développons ce point.

Soit établi l'ordre de fréquence des lettres en comptant 100 000 lettres dans un texte et en déterminant combien de fois reviennent l'a, le b, etc. ; nous obtenons ainsi la *police des minuscules*.

Reprenons le travail sur 10 000 mots en ne considérant que les lettres de début ; nous obtenons un nouvel ordre. La fréquence des lettres y est à peu près proportionnelle à la place qu'occupe chaque lettre dans un dictionnaire de la langue française. Les mots commençant plus souvent par des consonnes, les voyelles perdent de leur importance relative. Ainsi l'e qui revient près de deux fois plus souvent que le c dans la première statistique, occupe cependant moins de place que le c dans un dictionnaire.

Refaisons une troisième fois le travail sur 10 000 phrases, en ne considérant que les lettres *capitales* : nous obtenons la *police des capitales* dont l'ordre n'est pas nécessairement le même que l'ordre déterminé en second lieu, les phrases ne commençant pas indifféremment par tous les mots. Par exemple un grand nombre de phrases françaises commençant par *je*, *il* ou *ils*, l'I ou le J majuscules sont avantagés.

Ainsi dans chaque langue nous pouvons déterminer trois rangements par ordre de fréquence qui sont assurément différents.

Mais la question est encore plus complexe. Chaque écrivain a son

vocabulaire particulier ; on peut donc dresser une police à partir de ses œuvres, police qui diffère de celle d'un autre écrivain. Il y a là pour certaines Universités une source inépuisable de thèses statistiques passionnément intéressantes.

D'un siècle à l'autre les modifications de l'orthographe influent sur le rapport de fréquence des lettres. Il est clair que si nous remplacions le ph par l'f, la fréquence de f croîtrait au détriment de celle de p ; c'est ce qui est arrivé quand on a substitué l'a à l'o dans les imparfaits.

Enfin, quand on passe d'une langue à l'autre, tout est à recommencer. En particulier la *police des capitales allemande* diffère absolument de la nôtre, du fait que dans le corps des phrases, les substantifs commencent par une majuscule.

Conclusion : il ne faut demander à une police que de représenter la moyenne des résultats. Suivant le texte à composer, certaines lettres seront en excès, d'autres en défaut.

On est bien obligé d'admettre une convention quand on commande des caractères, *ce qui se fait au poids*. Pour fixer les idées, 100 000 lettres en IX pèsent 125 kilogrammes. Une page du présent volume contient 2800 lettres environ ; 125 kilogrammes font donc à peu près 35 pages. La composition du volume entier représente une tonne et demie de caractères. Il faut ajouter les approches et les interlignes.

Tout ceci posé, voici la police usuelle, dite *police Didot*.

Je range les lettres par ordre de fréquence, en me bornant aux plus fréquentes, puisqu'il ne s'agit que de fixer les idées.

Nombre de minuscules pour 10 000 lettres.

e,	930	p,	180
s,	550	q,	130
a, i, t,	500	f, v,	120
o,	470	b,	110
n, r, u,	450	g, h,	100
l,	400	j, x,	50
d,	300	y, z,	40
c,	250	k.	20
m,	240		

Nombre de capitales pour 10 000 lettres.

E, I,	50	F, G, H, Q,	20
A, L, M, R, S,	40	X,	15
C, D, N, O, T,	35	Y, Z,	10
P, U,	30	K.	7
B, J, V,	25		

Chiffres pour 10 000 lettres.

0, 1,	45
2,	35
3, 4,	30
5, 6, 7, 8, 9,	25

Nous savons que la *casse française* (§ 380) est divisée en casiers ou *cassetins* dont les surfaces sont inégales. Voici les surfaces choisies pour les minuscules; on vérifiera qu'elles concordent avec la table des fréquences.

Surface 6	e,
Surface 4	s, a, i, t, o, n, r, u, c, d, m,
Surface 2	l, p, q, f, v, b, g, h, x,
Surface 1	j, y, z, k, w.

En se reportant au § 295 du tome II de mon Cours *de Magnétisme et d'Électricité*, on vérifiera que les signaux Morse sont rangés par ordre de simplicité *à peu près* comme les lettres par ordre de fréquence. Le signal unique (point ou trait) est réservé aux lettres e et t; les signaux doubles représentent les lettres a, i, n, m.

La concordance est meilleure pour l'anglais.

Les aveugles gagneraient du temps si les signes Braille les plus simples étaient réservés aux lettres les plus fréquentes. Remarquons toutefois que l'application *rigoureuse* du principe est inconciliable avec un alphabet international, puisque l'ordre de fréquence varie suivant la langue.

APPENDICE III

Voici deux exercices intéressants sur le moiré.

On prend deux systèmes de cercles égaux, dont les centres sont sur l'axe Ox, aux distances $\pm a$ de l'origine. Ils ont pour équations :

$$y^2 + (x - a)^2 = r^2, \qquad y^2 + (x + a)^2 = R^2.$$

Donnons-leur des numéros d'ordre t et τ. Joignons les points tels que $t - \tau = \mu$, soit constant. Nous obtiendrons des courbes dont la forme dépend de la loi reliant les rayons aux numéros d'ordre.

Hyperboles d'Young.

Posons :

$$r = k\tau, \qquad R = kt.$$

Les courbes cherchées ont pour équation :

$$k\mu = 2C = \sqrt{y^2 + (x + a)^2} - \sqrt{y^2 + (x - a)^2}.$$

Pour chaque courbe C est une constante.

Écrivons l'équation sous la forme :

$$2C + \sqrt{y^2 + (x - a)^2} = \sqrt{y^2 + (x + a)^2}.$$

Élevons au carré, simplifions :

$$4C^2 - 4ax = -4C\sqrt{y^2 + (x - a)^2}.$$

Élevons au carré, simplifions :

$$x^2 - y^2 \frac{C^2}{a^2 - C^2} = C^2.$$

C'est un faisceau d'hyperboles.

Pour $C = o$, elles s'évanouissent suivant l'axe Oy.

Pour $C = a$, elles s'évanouissent suivant deux fragments de l'axe Ox.

Franges rectilignes.

Posons :

$$r = k\sqrt{\tau}, \qquad R = k\sqrt{t}.$$

Les équations des cercles deviennent :

$$y^2 + (x - a)^2 = k^2\tau, \qquad y^2 + (x + a)^2 = k^2 t.$$

La condition $t - \tau = \mu$, donne :

$$k^2\mu = 4ax.$$

Les franges sont rectilignes et normales à la droite qui joint les centres des cercles.

Ces deux systèmes de franges se retrouvent en Optique ondulatoire (voir notre Cours sur *les Interférences et la Diffraction*).

APPENDICE IV

La stroboscopie au cinéma.

Le cinéma offre une amusante application stroboscopique. Quand on nous montre des voitures allant au grand trot parallèlement à l'écran (les caissons d'artillerie apparaissaient souvent pendant la Guerre), il n'est pas rare que les roues tournent à l'inverse du sens normal. Nous sommes dans le cas d'un phénomène périodique qui semble rétrograder.

Je laisse au lecteur le soin de discuter le problème.

Voici seulement quelques données numériques.

Une roue se compose de *rais* ou *rayons* (en général au nombre de 14), d'une pièce centrale (*moyeu*) et de pièces courbes périphériques (*jantes*, généralement au nombre de 7). Le moyeu et les jantes sont creusés de *mortaises* dans lesquelles pénètrent les extrémités des rayons. La roue est entourée d'un *cercle* de fer qui assujettit l'ensemble. Dans le moyeu est la *boîte*, cylindre creux dans lequel entre l'essieu.

Les roues ont des diamètres les plus divers. Les roues du matériel d'artillerie devant passer dans des terrains *très variés*, sont de grands diamètres, de l'ordre de 1 m. 60, ce qui fait 5 mètres environ de développement.

On admettra que 18 kilomètres à l'heure (un tour de roue par seconde) constitue un trot assez allongé pour des chevaux lourds.

Enfin on supposera que le nombre de clichés par seconde est voisin de 21 ou de 28. On a tout ce qu'il faut pour discuter le problème.

On fera varier l'allure.

APPENDICE V

Voici une curieuse illusion d'Optique dont l'explication est fournie par le principe général si souvent invoqué : *nous interprétons d'après nos expériences antérieures, en choisissant les plus ordinaires.*

Dans un disque *r* vertical, fixe, de carton noirci, découpons *cinq* fentes radiales équidistantes; nous les appellerons *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, en allant dans le sens des aiguilles d'une montre. Derrière le disque *r*, très près et coaxialement, disposons un disque mobile R dans lequel nous découpons *six* fentes équidistantes A, B, C, D, E, F. Faisons tourner le disque R, à la vitesse d'un tour par seconde pour préciser. Plaçons le système des deux disques devant un fond uniformément lumineux. Successivement les fentes fixes seront découvertes et paraîtront lumineuses. Étudions le phénomène.

A l'origine des temps, posons que *a* et A sont superposés. Déplaçons-nous sur les disques dans le sens des aiguilles d'une montre. Les fentes B*b* sont distantes de $72 - 60 = 12°$, les fentes C*c* sont distantes de 24°, D*d* de 36°, E*e* de 48°, F*a* de 60°. Quand le disque R aura tourné de 12°, c'est-à-dire après un trentième de seconde, la fente *b* paraîtra illuminée. Après un nouveau trentième de seconde, ce sera le tour de *c*, et ainsi de suite. Enfin après 5 trentièmes ou un sixième de seconde, la fente *a* paraîtra de nouveau lumineuse.

Voici maintenant le principe qui règle le phénomène. Lorsqu'un objet passe brusquement par une série de positions distinctes, sans qu'on puisse voir les positions intermédiaires, on imagine le déplacement comme continu. Si au lieu *du même objet* on aperçoit successivement *des objets identiques*, comme rien ne permet de les discerner, on interprète le phénomène comme résultat du déplacement *continu* d'un objet *unique, déplacement qui peut ne pas exister.*

Dans l'espèce, nous voyons les fentes *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, s'illuminer successivement, dans l'espace d'un sixième de seconde; nous concluons invinciblement qu'un mobile lumineux tourne d'un tour en un sixième de seconde. L'existence de six fentes dans le disque mobile multiplie par 6 sa vitesse apparente.

Mais voici plus curieux. Rendons fixe le disque R; faisons tourner le disque *r* dans le sens des aiguilles d'une montre. Après rotation de 12°, c'est la fente F qui est illuminée. Et ainsi de suite. Le déplacement du

mobile fictif que nous créons invinciblement, tourne en sens inverse de la rotation du disque mobile réel.

Je laisse au lecteur le soin de discuter le cas général de n et $n+1$ fentes percées sur deux disques coaxiaux dont les vitesses angulaire sont ω et Ω. Il rapprochera les phénomènes du vernier et des phénomènes stroboscopiques analogues.

L'illusion d'Optique ici décrite est utilisée dans les montres pour obtenir une *aiguille foudroyante* fictive, aiguille tournant d'un tour en une seconde. Elle est réalisée au moyen d'un disque noir percé de cinq fentes radiales derrière lequel se meut un disque noir sur lequel sont peintes six ailettes blanches : le disque mobile est porté par la roue d'échappement. A chaque repos de cette roue correspond l'apparition d'une des ailettes dans l'une des ouvertures (voir mon Cours de *Chronométrie*).

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE VOLUME

VISION ET REPRODUCTION DES FORMES ET DES COULEURS

Les numéros des renvois sont ceux des paragraphes.

A

Abat-jour 161 (effet).

Aberration : instruments 24, 25; — de sphéricité (œil) 18, 19 (conséquence), 20, 21.

Abney 358 (expér.).

Absorption : Voy. Bandes; — coefficient 283 (constant), 348 (max., min.), 351 (variation), 362 (d'un liq. pour ultraviolet); — d'énergie 351, 369; — de lumière : et action 355; par atmosphère 121 (aubes pâles, soirs rouges); inévitables 121 (appareil disperseur); et intensité 116; négligée 228; pertes 126 (éliminées); prisme 124, 125; relative 116; par transmission 411; par verre 111; — matières colorées 277 (coeff.), 330 (max.); — Voy. Pouvoir; — variable 158 (atmosphère); — 332.

Accommodation : bonne (plus ou moins) 23; — convenable 18, 23; — et convergence 48, 61, 67, 76, 78, 80, 98; — degré 96 (et distance); — égalité 49; — facile 82; — sans fatigue 67; — imparfaite 20; — inégalité 50; — invariable 76; — paralysie temporaire 67 (partielle); — et relief 60; — réticule 194; — série 62; — variations 60, 62, 66 (énormes), 76.

Acétate de sodium 299.

Acétylène : 137, 145, 146 (éclairage : becs; étalon).

Achlorope, Achloropsie : 250.

Acides : acétique 291, 292, 294, 295, 300, 313; — azotique (nitrique; eau-forte) 288, 290, 294, 296, 331, 335, 356, 376, 377, 385, 397, 403, 413, 415, 416; — chlorhydrique 285, 290, 296, 299, 303, 307, 310, 330, 349 (synthèse), 352, 354 (solution : électrolyse), 377, 414; — chlorique 296; — citrique 278, 297, 298; — décapage 397; — faible 297; — ferricyanhydrique 303; — ferrocyanhydrique 303; — fluorhydrique 385; — formique 291, 333, 334; — gallique 292, 295, 309, 413; — hypochloreux 296, 354; — morsure 376, ., 378 (graduée), 397 (gillotage), 405; — oxalique 306, 308, 310, 347, 351, 356 (oxydation); — picrique 279, 320; — pyrogallique (pyrogallol) 273, 295; — sulfhydrique 313; — sulfurique 282, 284, 288, 291, 303, 308, 324, 331, 332, 344, 356, 385; — tartrique 272, 291, 305, 307, ., 309, 312, 333, 334.

Acquisition : de l'espace 42; — des idées 35; — d'un langage, de la parole 36; — par toucher 35, 36; — par l'usage 56.

Actinomètre : en argent chloruré 330, ioduré 331; — en cuivre oxydé 330, 332; — électrique 330; — soi-disant 356; — à sulfure d'argent 330, 332.

Actions : calorifique 329; — chimique 287 (cheminement), 337 (vapeur), 369 (et agitation); — Voy. Daguerrienne, Lumière; — lumineuses 331 (non uniformité). Voy. Corps, 349 (nature); — photochimiques : 186; lois 347, ..., 352 (autolimitation), .. — .., 370; — photographiques 347; — primaire 187, .., 190 (limite), 191 (maxima), 192 (lumière d'intensité constante); — Voy. Radiations.

Acuité : chromatique 249; visuelle : et âge 15; augmentée 70; différente 66; diminuée 18, 62; périphérique 16, 17; et pouvoirs éclairants 130 (invariable), 131; variant 194.
Adam et monde extérieur 30; 44.
Adhérence 414 (phénomènes; Al, Cd, Mg, Zn).
Affaiblissement : mutuel 22 (irradiations voisines); — plaques 284 (négatif).
Agitation (température photochimique) 347, 369; — voy. Molécules.
Agrandissements 278.
Aiguilles : enfilage 42; — de repérage 409; — verticales 91; — App. V.
Aire : des blancs 397; — connue 114; — éclairée 109; — éclairement par unité 104; — petite 132; — surfaces (d'émission, de réception) 104.
Albedo 157, 160 (lune).
Albumine : bichromatée 381, 399; — voy. Clichés; — coagulée 316; — insoluble 312, 314; — voy. Papier, Photographie; — préparation 295; — sensibilisation 399; — 293, 308, 325, 417.
Alcool 282, 289, 291, 294, 295, 298, 306, 316, 324, 326, 330, 335, 377, 385, 411.
Alizarine 204.
Alliage des caractères d'imprimerie 390, ., 392.
Almeida (d') 76, 77.
Alphabet Braille 39, App. II.
Alun, Alunage : 270, 316, 321, 417.
Amalgamation 325, 326, 416.
Amidon : colle 406, 410; — voy. Grain; — rôle 348; — 296, 297, 333.
Ammoniac (Gaz) 297, 336.
Ammoniaque 283, 305, 312, 352, 356, 357, 372, 385.
Analyse spectrale 124.
Anamorphoses 173.
André et Wolf : 24 (expér.), 25 (appareil).
Anérythrope, Anérythropsie : 250, 251.
Anesthésie locale 72 (cocaïne).
Angle : aigu 55, 87, 102; — apparent 96; — ascensionnel 29, 51; — comparaison 28 (vision indirecte); — côtés 102 (déviation); — creux 87; — déterminé 41; — de deux lignes visuelles 28, 65; — droit 26, 73; — erreurs : d'estimation 102, linéaire 26 *bis*; — latéral 29; — minute 15; — modification 75 (objet reconstitué); — moyen 105; — obtus 55, 87, 102; — saillant 87; — solide 104, 112, 149, ., 151, 155, 160; — au sommet 26 (triangle équilat.); — torsion 29; — variable 48 (prisme), 78, 182 (découvert), 213 (secteur blanc).
Anhydrides : carbonique 306, 336, 338, 353 (respiration végétale), 356; — chromique 312; — sulfureux 311.
Aniline : voy. Bleu, Couleurs, Cyanine, Encre, Eosine, Fuchsine, Safranine, Violet.
Anneaux : voy. Newton; — oculaire 231.
Anorthoscope 173, 175.
Antimoine 390, 392.
Antiques (Caractères) 388.
Antirhéoscopes 99.
Apparences : et réalité 93; — variations 60.
Apparitions : 41; — images doubles 47, 49 (voisines).
Appréciation : par contraste 366; — voy. Couleur d'une surface, Eclat, Distances; — erreur 258; — fausse 259 (couleur); — des longueurs 26; — voy. Relief.
Aquafortistes 372, 376 (procédés), 395.
Approche 387, 389.
Aquarelle : pour chromo 409; — couleurs 318 (molles), 340 (en tablettes); — dégradés 371; — 205, 206, 208, 211.
Aquatinte : voy. Gravure, Lavis.
Arago 24 (lunette et disque).
Arc : électrique 120 (blanc), 161, 190 (fréquence), 214, 231; — à un mètre 15 (degré, minute).
Arcy (d') 190 (expér.).
Argent : voy. Azotate, Bichromate, Bromure, Carbonate, Chlorure; — chloruré 330; — couche mince 326; — crochet 290; — voy. Cyanure, Gélatinobromure, Gélatinochlorure, Ioduration, Iodure; — lame 291 (trait), 328 (pur), 330, ., 332; — plaques 336, ., 338, 382; — précipité 294 (par fer); — réduit 291, 344; — voy. Sulfure; — 288, 296 (?), 299, .., 302, 327, 353, 369.
Aristote 36.
Arrondissement 397 (gillotage).
Ascendance 30, 31.
Ascension 40 (escalier).
Association : dessins 79; — sensations et objets extérieurs 93.
Astigmatisme 18, 29 *ter*, 50, 66.
Astronomie : voy. Observations; — et parallaxes 60.
Atlas musculaire, tactile, visuel : 42, 43.
Attitudes conventionnelles, vraies. 169.
Aüer (Bec) 116, 120 (vert), 144, 145 (description, manchons), 161 (et yeux), 193, 217, 228, 259.
Autocopie, Autocopiste Noir : 418.
Autographie 406.
Aveugles : pour bleu, rouge, vert 250; — voy. Cheselden; — chiens 40; — voy. Couleurs; — nés 35; vue rendue 37 (exemples), 73; 38 (probl. de Molineux); 39 (éducation), 40 (facultés), 41 (imagination), 42 (conquête des représentations spatiales); — sourds et muets 34, 36 (éduqués : cas célèbres), 39, 40.
Axes : de coordonnées 55; — cristallographique 227; — optique : lentilles 90;

œil 14, 27, 72; — de révolution (yeux) 14, 65; — de rotation 29.
Azotates (Nitrates) : d'argent 271, 275, 290, .., 293, 295, 296, ., 298, 301, 313, 333, 334, 346, 350, 352; — ferrique 291; — de mercure 416.
Azur 202; — **Azurite** 201.

B

Babinet 227 (compensateur).
Bagues d'exercice 28.
Baguette : blanche 170 (flexible, rigide); — de bois 60 *bis*, 259; — écrans 225; — ombre 116, 127, 132, 259; — opaques 234 (grille); — de verre 250 (dans bec Bunsen obscur).
Balance de Roberval 140.
Banc d'optique 109.
Bandes : d'absorption 348; — blanches 22, 164 (images); — de dessins 168; — éclairées 107; — d'étoffe 170; — lumineuses 287 (parallèles); — monochromes 345 (trois); — noires 164; — de papier 389 (et ligne d'impression); — sombres 345; — de trous 39,
Barre au rouge 151 (argent, fer),
Baume 109, 125 (de Canada).
Bayard 301 (positif).
Becs : voy. Acétylène, Aüer, Bengel, Bunsen; — économiques 144; — à gaz, ordinaires 120 (jaune rougeâtre), 144 (circulaire, papillon), 163 (éclairement); — de lampe : à huile 139, à pétrole 141; — renversé 145.
Becquerel : déclanchement et continuation 350 (rayons oxydants, réducteurs); — loi 360; — photographie des couleurs 345; — radiations 330 (action spécifique), 366 (classification), 368 (différences spécifiques rayons actifs, continuateurs); — 349.
Bengel (Bec) 144.
Benzine 285, 294, 302, 317, 321, 381, 382, 385, 397, 398, 400, 415.
Berceau 375.
Berthelot 350, 353 (principe du trav. max.).
Besicles : concaves 66; — verres : colorés (différents) 45, 77; interchangeables 82; — 80.
Bessel 24 (lunette et disque).
Bezold (Von) 241 (remarques), 242.
Bichromates : alcalins 323; — d'ammonium 313, 318, 323, 325, 399; — d'argent 313 (papier); — de potassium 279, 282, 284, 312, 314, 315, 318, 322, 346.
Billet 171 (expér.).
Billets de Banque 92 (faux, vrais).
Binocle : bichrome 77; — conservé 90; — à verres convergents 78.
Binoculaire : exploration 62; — illusion 98; — Vision : des couleurs 267, ., 269; et distances 78, 98; voy. Hérédité; phénomènes généraux 44, 45 (définition), . — ., 50; points correspondants 51, .—., 58; voy. Relief, Strabisme; — 91.
Bistre 205, 318, 409 (clair, foncé).
Bitume : de Judée 221, 294, 376, 381 (héliogravure), 382 (héliographie, .., 385, 398 (photogravure au trait), 399, 415 (lith. sur zinc); — vulcanisé 381; — 205, 400.
Blanc : d'amalgame 416; — de l'aquarelle 206; — d'argent ou de plomb (voy. Céruse); — coefficient 246; — de comparaison 231; — couvrant (ou non) 197, 216; — création 393, 405; — devenant coloré 133; — voy. Ecrans; — entre deux lettres consec. 387 (approche); — d'Espagne 391; — fixe (sulfate de baryum) 197; — voy. Fond; — de gouache 206; — par grain usé 375; — par grattage 401; — intercalation 392; — mat 326 (diffusant); — de Meudon, de Troyes (voy. Craie); — objectif : définition 121, 195; 128, 132, 209, 240, 244, 266; — d'ordre supérieur 234, 242; — et peintres 248, 266; — physiologique 128; — et poudres colorées (mélange) 219, 248; — pur 222, 240, 370; — voy. Sensations; — subjectif 128, 195, 234, 244 (définition imprécise), 245; — sulfuration 326; — symbole 209; — et triangle des couleurs 237 (W); — typographique 387; — usuel 244; — de zinc 197, 329; — 221, 227, 240, 342, 394, 395, 397, 400.
Bleu : d'aniline 277, 320, 382 (B); — clair 409; — de cobalt (Azur, Thénard), 120, 202, 208, 212, 221, 233, 239, 246, 248; — de cuivre (lumière, Pompéi) 202, 233; — des émaux 324; — voy. Fond; — foncé 402, 409; — fondamental 120, 221, 226, 236 (R), 237, 241; — franc 223; — long. d'onde 120; — de machines 304, 305; — outremer (artificiel, naturel) 202, 208, 221; — pâle 409; — de Prusse (de Chine, de France, minéral, de Paris) 120, 202, 217, 221, 222, 248; ferrocyanhydrate ferrique 300, 303, 308; 340, 341; — de Turnbull (ferricyanure ferreux) 303, 305; — usuel 248; — verdâtre 215; — 379, 402.
Blondel et : Broca 114 (photomètre); — Rey 191 (éclairs).
Blondlot 336.
Bobine d'induction 185 (étincelles : utilisation).
Bois : buis, cormier, debout, 393; — voy. Dessin; — dur 393, 408 (axes); — voy. Gravure; — d'interprétation 393; — peinture 208; — poirier 393 (de fil), 408; — 42, 107.
Bolomètre 152.
Bord : rectiligne 20; — du Soleil 25 (et Vénus); — de l'un des yeux 47 (pression).

Bouasse : expériences (1892-93) 358, .—.. 365 (inversion et quantité d'énergie); radiations 366 (continuatrices : toutes), .. 368 (intensités relatives); 369 (agitation : température photochimique); — noir d'un cliché 276, 361 (définition); — origines 370 (chap. VIII).
Bougie : de cire 135; — décimale 138; — éclairement et acuité 15; — éclat 158; — étalon 138; — voy. Flamme; — intensité 104; — lumière 132, 233 (et couleurs), 259; — mètre 110, 160, 161 (lecture), 163, 209; — ombre 259; — réelle 138; stéarique 136, 137; — 46, 48, 54, 65, 96, 116, 331, 370.
Bouguer : loi de Fechner 115; — photomètre 106; — photométrie : lune 160; soleil 158, 159; — principe 116, 118, 133 généralisé).
Bourrage 39.
Bouty 242, 369.
Braille 39, App. II.
Bravais 97, 227 (compensateur).
Brewster 79, 83, 90, 92.
Brique pilée 199 (badigeonnage).
Broca : voy. Blondel; — expér. 194.
Brodhun : voy. Lummer; — photomètre 183.
Bromure : d'ammonium 271, 293, 295; — d'argent 271, .., 274, 282, 291, 293, 326, 344, 350; — de cadmium 289; — de potassium 271, 295, 350.
Brosse : douce 407; — et empreinte 391; — et épreuve d'imprimerie 39; — métallique 405.
Brücke : fatigue (expér.) 193, 264 (contraste); — théorie 62, 79.
Bruit 40, 42.
Brun : noir 409; rouge, van Dyck, 318; 402.
Brunissoir 372, 375.
Buffon 50 (champ de vision : neutralisation).
Bunsen : bec 145, 259 (obscur et baguette de verre), 330; — photomètre 108; — et Roscoë 354 (actions chimiq. de la lumière), 355 (induction photochimique).
Burin 372, 376 (et état d'eau-forte), 380 (échoppe), 393, 397 (trait).

C

Cadre : bois 39, 418; — incliné 12; — rectangulaire 412.
Caléidophone 165.
Caoutchouc : Voy. Dessin; — gomme 404; — grandissement ou réduction 412; — tube 329, 377; — 28, 285, 294, 302, 321.
Caractères : Braille 39; — d'imprimerie (typographiques) : 280, Voy. Alliage, casse 390, classification 387; composteur, cran, 390; gravure sur bois 393, lisibilité 389, et mouillage 394, petits 67, spécimens 388; — en relief 36; — rouges, verts, 45.
Carbonates : d'argent 297; — de calcium 347; — de potassium 290, 303, 324; — de sodium 273, 297, 299, 321.
Carcel : étalon 114, 132, 138, 140, 143, 146, 158; — heure 144, 147; — lampe 110, 114, 139, 140 (emploi), 277.
Carmin : voy. Rouges.
Carreau (Méthode du) 10.
Carrelage : perspective 3; — hexagonal 15 *bis*.
Carrés : blancs, noirs (irradiation) 19, 23; — voy. Distances; — images (perspective) 3, 5; — parfaits 101 (illusion); — et rond 38; — rotation 26; — rouge, vert, noir 258.
Cartes : Voy. Ciel; — géographiques 406; — de visite 404; — App. I.
Carton : blanc 22, 171, 175, 193, 213, 231, 333; disques 55, 185; — coloré 228, 261; — fabrication App. I; — feuille mince 89; — fixe 134; — flan 391; — avec lettre 36; — noir 78, 175 (immobile), 229; — oscillant 175, 261; — à ouvertures d'aires connues 114; — tournant 134, 185, 211; — 325, 394.
Casse 36, 380 (de musique : compliquée), 390 (cassetins), 391, App. II.
Catalyseur 349.
Cataracte 37.
Causalité (Idée de) 31.
Cécité : et hygiène 39; — partielle 16, 29 *ter*, 250; — et propreté 39.
Celluloïd 278, 382, 403; feuille mince 281, 339, 340.
Cellulose : feutrage 297; — rôle 348.
Centres : optiques oculaires 53, 54, 95; et points nodaux 29, 51; 83, 280; — de rotation 29.
Cercles : blanc à secteur noir 117 (rotation rapide; — brillant 24 (fond obscur); — concentriques 16 (et rayons : scotomes), 178; — contact 26 *bis*; — décrit 29 *ter* (droite de visée); — de diffusion 18, 20, 21, 23; — de direction 29 *bis*; — éclairé 95; — d'éclairement uniforme 20, 21; — Voy. Glissement; — horoptère 53, 58; — horizontal 53; — mobile sur c. fixe 29; — noir 24 (fond brillant), 173; — perspective 6; — photographié 366; — transformation 412; — App. III.
Céruse 153, 157, 160, 164, 197 (obtention), 198 (grillage), 208, 329, 373 (anti-siccative).
Cerveau : d'aveugle 41; — humain actuel 31; — modifications 43; — du nouveau-né 30; — sensations 33.
Chambre : meublée 101; — noire 100, 158, 194, 272, 290, 292, 338, 344, 402, image 85, spéciale 281, verre rouge 127; — non

éclairée 256; — obscure 185, 190, 250 (et lumière du sodium); — peu éclairée 161; — photographique 88 (divisée), 280, 342 (à trois objectifs), plate 363 (à volets); — vide 101.
Champ : augmenté 71; — courbure 18 (convenable); — éclairement 23 (irradiation); — lumineux 19, 22; — obscur 19, 253, 256; — observé 109; — de Vision : 12, cécité partielle 16 (permanente), courbure 18, des deux yeux 68 (utilisation alternative), limites 17, et mouvements 99; et objets 59, 93; relation modifiée 69, torsion 18, voy. Visuel.
Chandelles : trente-six 93; — de suif 135, 136 (mèche), 137.
Chapeau haut de forme et plinthe 101.
Charbon : ardent 190 (tournant); — de bois 196; — calciné 336; — voy. Epreuves: — d'une lampe à incand. 19; — voy. Photographie, Poudre: — de saule 372; — tablette 335.
Charles II 16 (expér.).
Charpentier 193 (fatigue : expér.).
Châssis : de chambre noire 290; — presse 292, 297, 305, 307, 323; — de presse lithogr. 408; — de repérage 409; — transposeur 89.
Chauffage par liquides vaporisés 146.
Cheselden 37 (*Phil. Trans.* 1728), 44.
Chevreul : couleurs 223, 224.
Chiasma des nerfs optiques 44.
Chiens : odorat, orientation, 40.
Chiffres : Braille 39; — page 28 (copie).
Chimiste : préoccupations 270, 347, 369.
Chlore 296, 303, 308, 349 (hydrogène; chlorures et oxydes d'éthyle, de méthyle; produits d'addition et de substitution), 352 (limiteur), .., 355.
Chlorures : d'ammonium 297; — d'argent 283, 284, 296 (décomposition; noir), 301, 327, 333, Voy. Papier, 352, 353; — de calcium 321; — de cuivre 284 (bi); — double (chloroplatinite) 310; — d'éthyle 349; — de fer 283, 284, 300, 303, 305, .., 308, 347, 351, 356, 372, 377, 386, 416: — de lithium 354; — de mercure 283, 291; — de méthyle 349; — d'or 299, 326, 333, 349 (papier); — de potassium 330, 346, 354; — de sodium 297, 330, 350, 354; — de strontium 354.
Chromolithographie, Chromos : 341, — 409, — 410, 411 (colorations : cause).
Chromozincographie 384 (en creux).
Ciel : carte 287; — fond obscur 25 (représentation); — illusion 97 (coupole).
Cinabre : Voy. Rouges.
Cinématographe 11 (perspectives correctes : invraisemblance), 168, App. IV.
Circonférence : d'une bouteille 101; — de cercle 6 (perspective); — horoptère 53, 58.
Cire : blanche 292; — cierges 135; — jaune 403; — à modeler 376; — peinture 206; — vierge 278 (chaude); — 317, 376, 397.
Citrate de fer (ammoniacal 300, 305, 393.
Clarification 270.
Clarté 63 (augmentée), 132.
Claudet 87.
Clichage 39, 391, 397.
Clichés : à l'albumine 295; — carte du ciel 287; — cinq régions impressionnées 358; — éclairement 362; — empiétement 82 (évité); — galvanique 319, 372 (galvano d'une planche gravée originale); — d'imprimerie 391; — inversion 344, 364 (par surexposition), 365 (et énergie), 367 (roue); — Voy. Noir, Noircissement; — parties transparentes 342; — pelliculage 285; — planètes et étoiles 92; — voy. Plaques; — poses superposées 368; — pratiquement opaque 361; — regardé 371; — renforcement 283; — retourné 393; — second 382; — transparent (dia-négatif) 292; — vieux (utilisation) 288; — vues (deux) 88; — 89, 273, ..., 277, 279, 281, 297, 301, 302, 305, 313, 323, .., 326, 333, 363, 381, 398, 400.
Clouet 12.
Cochenille 204.
Coefficient : Voy. Absorption; — d'égale : acuité 130, ., 132; clarté 132; — voy. Facteur, Luminosité; — de proportionnalité 104, 106 (modifié).
Cœurs dansants 261.
Coin : absorbant 115, 370; — méthode 370 (étoiles : grandeur).
Colardeau 11 (expér.).
Colle : Voy. Amidon; — à bouche 311, 312; — de fécule 406; — forte 206, 208, 311; — de gélatine 406, 410; — de gomme arabique 410; — de pâte 213, 391; — de peau 206; — peinture 216 (blancs); — de poisson 208, 311, 312, 406.
Collematières 311.
Collodion : caoutchouté 285; — couchage 383; — épais 324; — épreuve 294; — pour ferrotypie 294; — humide 285, 289, ., 291, 293, 295; — Voy. Ioduration; — normal 307; — pelliculage 285; — voy. Photographie; — préparation 289; — sec 293; — sensibilité 302; — 281, 315, 321, ., 323.
Colonnade : perspective 7, 11.
Colophane 297, 373.
Colorations : cause 411 (absorption par transmission); — différentes 120 (lumières des sources usuelles); — matières colorées 216 (mécanisme); — par soustraction 216, 339, ., 341; — des tissus 216.
Compas 28, 380 (à branches courbes).

Compensateurs : Voy. Babinet, Bravais, Soleil.
Composition : lithographique 403 (effaçage); — typographique : clichage 391, interlignée 387, linotype, en mobiles 391, pleine 387, 389, 390, 398.
Composteur 390.
Concepts fondamentaux 36.
Condillac : statue 30, 31 (odorat); vue 32, 38; 34 (toucher), 35 (acquisitions); — traité des sensations, 31, 32, 34, 35, 38, 42.
Cônes : de direction 29 *bis*; — direction moyenne 104; — éléments (rétine) 15 *bis*, 16; — incandescent 145; — et lumière émise 150; — perspectif 6, 9 (sphère), 12; — 57.
Coniques : et droites 58 (raccordées); — propriétés 6 (utilisation); — symétriques 29 *bis*.
Connaissance : antérieure 73 (forme); — du Monde extérieur 30, . — ., 43.
Conscience : et champs visuels 44; — de la distance 61 (perdue); — d'éloignement 96; — inutile 45 (abolie); — de l'odeur 31; — et objet 41; — et petits mouvements 99; — position relative 60 *bis* (actuelle : yeux); — rétablie 94 (difficilement); — et sensations 30, 60 (actuelle et variation); — vague 60 (muscles : degré de contraction).
Conservation : d'énergie 104; — en mobiles 391 (Bottin, Indicateur).
Contact : apparent, électrique, 25; — voy. Images; — impression (plaque sensible) 279, 281, 282 (contre-types positifs), 287, 302, 326, 339, 343, 361; — instant 25; — maintenu 333; — optique 109; — parfait 287 (émulsion et réseau); — avec peau 34; — voy. Pointés; — réel 25; — réseau et plaque sensible 400; — sensation (dur, mou, ..., visqueux, .., chaud, froid) 34.
Continuité : apparence 371; — du moi 34; — de résistance 36..
Contraste : des couleurs 132, 408; — égalité 109; — exagérant 161; — exagéré 283; — jugement 366 (inversion); — simultané 132; pur 257, 260, 262; 258, 259, 263 (importance pour les peintres); — successif 258, 259, 263; — 261.
Convergence : Voy. Accommodation; — degré 76; — exercices 72; — modérée 72; — modifiée 81; — variations 62, 76, 81; — Voy. Visuelles (Lignes).
Coordonnées : axes 55; — choix 29 *bis*; — polaires 17.
Coq 30 (conseils).
Cordes : de retour 408; — sans fin 26 *bis*; — vibrantes 165, 170, 176 (rectangulaires).
Corne 303, 311.
Cornée transparente 17, 18, 95 (salie).
Cornet acoustique 329.
Cornu 124 (spectrophotomètre).
Corot 279.
Corps : et action lumineuse 348 (modifiée); — caractères typographiques (hauteur) 387, 389; — chaud 94; — colorés 223 (catalogue); — concaves, convexes, 87; — voy. Couche mince; — diffusants 155, 268; — dur 405 (usure de pierre); — forme 151 (impossibilité de la reconnaître); — froid 94; — de grain fin 403; — gras 403 (et pierres), 413 (et zinc); — à graver 381; — lumineux (par eux-mêmes) 148, 153, 188 (sensations); — mats 153, 268; — noir 153 (parfaitement); — porosité 336; — propriétés superficielles 336; — pulvérisés 157; — quelconques 3 (perspective); — rapprochés 338 (images); — recouvert 154 (émission); — représentation 34; — résineux 403 (et pierres); — terme de comparaison 42; — vibrant 176; — volatils 332 (créés par lumière).
Correspondance : empirique 52; — voy. Fovea; — hypothèse 53 (simple), 55 (plus exacte); — lois 51, 55, 56, 93 (faussée); — des méridiens 51, 55 (verticaux apparents); — origine 56.
Correspondants (Points) des rétines : 44 (identiques), 46, 48 (nouveau-né; loi); 51 (définition), 52 (foveas), 53 (hypoth. simple), 54 (vision indirecte : rôle), 55 (hypoth. plus exacte), 56 (origine), 57 (courbes correspondantes), 58 (horoptères : forme générale); 62 (crus inexistants : Wheatstone).
Coton : voy. Mèches; — poudre 289, 294, 324; — tampon 290, 326, 382, 399.
Couchage : méthode Maskell-Demachy 318; — solutions 383.
Couche : colorée 411 (épaisseur); — égalisation 383 (procédé industriel général); — voy. Fer, Gélatine; — de grains 342; — grasse 405 (supprimée); — inerte 385; — liquide 362 (variation d'épaisseur); — matières minérales, 393; — mince (corps : modification) 328, ..., 332; 385; — noire 329; — de pierre 407 (retenant l'encre physico-chimiquement); — préparée 407 (supprimée); — Sensible : bitume de Judée 381, 398, 400; collodion 290 (extension et sensibilisation); daguerréotypie 326; détachable 302; éclairement 360; émulsion 344 (panchromatique); épaisse 304, 381; gélatine bichr. 413; gomme bichr. 318; hétérogénéité 358; et lumière 369 (modification semblant permanente); pelliculage 285; poudre en suspension 314; préparation 315; support 294 (opaque ou transparent); et vapeurs 332; 271, 278, 279, 281, ., 283, 286, 287, 300, 330, 333, 334, 342, 359, 361, 385, 399; — superficielle 416

(rongée); — transparentes colorées (superposition) 217, 339 (agissant par soustraction), 341; — uniforme 405 (obtention); — vitrifiable 324.
Couleurs : addition 218, 220, 232, 245, 266, 342; — d'aniline 239, 382; — voy. Aquarelle; — aspect 218, 232, 233 (et éclairage); — atténuées 345; — et aveugles 42; — bavures 409; — binaires 222; — voy. Binoculaire : vision; — sur blanc 371; — bronze, chair, 409; — changement 215 (continu), 259; — chaude 266; — choix 411; — du commerce 221 (les plus employées); — complémentaires 217, 240, ., 242, 250, 255, 258, 263, 339, ., 341; — complexes 17 (vision); — composées 248, 339; — composition 233 (et aspect), 242 (donnée); — confusion 250; — voy. Contraste; — se correspondant 124; — définition 120, 209, 232; — dénomination 195; — distinction 32; — diverses 205; — voy. Eclat; — et éducation 214; — erreurs 93, 214; — étude : comparative 368; subjective 232, . — ., 251; — exagérées 132; — facteur d'intensité 237; — fondamentales 221 (peintres), 226, 237, 241, 246, 248; — franches 223; — froides 266; — groupées 263; — harmonie 94; — impression 396 (papiers peints; étoffes imprimées); ordre 409, 411; — intensités 209 (définition, mesure); et nom 214, 223; — juxtaposition 220 (touches), 339; — voy. Lames minces; — lavées de blanc 214, 223, 239, 240, 339; — et lisibilité 130; — luminosités 223, 266; — voy. Matières colorées; — mélange 221, 237 (blanc), 245; — moites 206; — molles 318; — naturelles 318 (imitation); — obtention 384 (gravure au trait creux); — opaques (pas) 411; — en pains 206; — et persistance 254; — voy. Photographie; — picturales 248 (trois : théorie); — primaires 222; — principales 236; — rabattues 214, 217, 223; — et radiations simples 120 (à peu près); — remplacement 226, 234; — voy. Reproduction : procédés; — rétablies 343; — voy. Rétine; — riches 216; — saturation 263; — saturées 216, 223, 240, 245; — simples 120 (repérage), 209 (définition), 232, 236 (P, Q, R), 237, 239, ., 241, 245; — spectrales 120, 221 (moyennes), 223, 234, 237, 240 (ton), 245, 248; — subjectives 248; — superficielles 216; — superposition 250, 409; — surcharges 409; — d'une surface (appréciation) 132, 149; — table (non existante) 222, ., 224, 242, 243, 250; — teinte 345 (même), sur 371 (plate); — ternaires 222; — ternes 266; — ternies 263; — théorie 243 (et phén. de Purkinje); — ton 214 (et intensité des radiations), 240 (caractéristique), 263; — et toucher 40; — transmises 339, 340; — triangle 236, 237, 244, 345; — trois (procédé aux) 318, 339; — virage au bleu 223; — voy. Vision; — voisines 263; — vues à travers une autre 264; — 36.
Courant : d'air 40, 141 (central); double 139, 144; — alternatif 190 (éclairage); — électrique 152 (par échauffement), 189 (périodique), 327, 328, 330.
Courbes : caractéristique 176 (de l'intervalle); — coeff. d'acuité et long. d'onde 130, 131; — correspondantes 57 (sur les rétines); — des couleurs simples 237, 245; — de déplacement 29 *ter* (point de visée); — des disques de Talbot 215; — des éclairements 21; — expérimentale 242 (radiations simples); — faisceau 174; — fusion stéréoscopique 86; — gauche 54 (du 3e degré); — horoptère 46; — illusion 102; — intersections : lignes mobiles 172, 173; moiré 178, ., 180; — log. vulg. 116; — de L. Rayleigh 242; — mobiles 170 (unique : déplacement varié), ., 172 (tournantes), 173 (anorthoscope), ..., 177; — des noirs 358 (clichés), 359, 361, 363 (grands éclairements), .., 366; — perspective, 6; — quasi horizontales, verticales, 29 *bis*; — du 4e degré 58 (réduite au 3e); — représentative 20; — vues simples 57; — 104.
Couteau 36 (signe), 380 (à cinq lames).
Craie 197, 299, 335 (tablette insolée).
Cramoisis : voy. Rouges.
Craticulation 6.
Crayons : d'aluminium 414 (traces sur verre); — Conté 207; — lithographique (gras) 403, ., 405, 409; — de magnésium 414 (traces : verre, porcelaine); — au mercure 416; — à la mine de plomb 207; — noir, rouge, 404; — 60 *bis*.
Crémaillère double 112.
Creux : voy. Reproduction; — 394, 395, 397 (gillotage), 406.
Cristallin 18 (inégalités), 37 (opaque).
Cros (Procédés) : addition 342 (photogr. des couleurs : Ducos du Hanron); imbibition 320.
Cube : en bois 42; — et épreuves stéréoscopiques 89; — et globe 38; — métallique (rempli d'eau bouillante) 151, 153, 154; — en papier 42; — perception 41; — perspective 4, 75 (deux conjuguées); — transformation 75 (translation des points de vue).
Cuir 303, 311 (rognures), 372 (coussin), 394, 408 (gaines; graissé).
Cuivre : voy. Cylindre; — laminage 372; — oxydé 330; — voy. Planches; — plaque 325, 330 (épaisse), 337, 372, 381, 382, 386; — plaqué d'argent 326, 327; — repoussé 372; — voy. Sulfate; — usure 372; —

322, 325, 338, 375, .., 378, 380, 390, 403.
Curiosité 35 (éveil).
Cursive 387 (caractères).
Cuve : cylindrique 362; — à faces parallèles 348; — peu profonde 391.
Cyanine 382.
Cyanures : d'argent 284; — de mercure 325; — de potassium 284, 294, 303.
Cylindre : de bois 107; — contre-pression 394; — de cuivre 374 (taille-douce : encrage et essuyage mécaniques); — demi 329 (enfumé); — de fer-blanc 334 (expér.); — imprimeur 394; — de presses 374 (taille-douce), 394; — porte-cliché 394; — au rouge 151 (argent, fer); — de verre 362.

D

Daguerre, Daguerréotype : 326, 327 (reproduction : Poitevin).
Daguerréotypie 292, 326.
Daguerrienne (Action, Image) 338.
Dalton, Daltonisme : 250.
Décalage en marche 181 (deux roues sur même axe).
Décalcomanie 410.
Décalque sur : pierre 406, zinc 398.
Déclanchements 349, 350 (et continuation : réaction photochimique), 351, 353.
Décors de théâtre 11.
Découvertes à faire 35.
Déformations : en barillet 18; — énormes 87; — d'ensemble 412; — image rétinienne 43; — de l'objet 75 (déplacement des points de vue ou des perspectives), 76 (petites : indifférentes), 77 (restitué); — perspectives 12; — stéréoscopiques 86; — théorie géométrique 73, .., 76.
Dégradation, Dégradés : 215, 371, 409.
Densité superficielle 104 (et masse).
Desains : voy. Provostaye (de la),
Dentelures 19 (irradiation).
Déplacement : angulaire 29 (ligne visuelle), 71; — ascensionnel 29; — d'attention 68; — concentrique à sphère fixe 29 (sphère mobile); — d'images 48, 80 (des perspectives), 82; — latéral 29; — notable 88; — des perspectives 74, 75 (déformation de l'objet), 78; — des points de vue 74, 75 (déform. de l'objet); — relatifs 60 (exagérés), 60 *bis* (nul : yeux); — en sens inverse 99; — système rectangulaire 29 *ter*.
Descartes — Plateau : théorie (irradiation) 22, .., 25,
Dessins : appareils 59; — artistiques 404; — voy. Bandes; — bichrome 77 (sur fond noir); — blanc d'amalgame 416; — sur bois 393; — sur caoutchouc 412; — conservé 382; — copie (bleu) 304, 305; — au crayon gras 403; — déplacés 81; — détails 116 (et éclat); — et dimensions réelles 96; — dissemblables 79 (association); — double 78, 80; — effet 404; — empiétement 82 (évité); — emploi 72; — à l'encre : de Chine 371 (passage continu du blanc pur au noir parfait), 381, 398; grasse 397, 406; — à l'envers 393; — en fer 416 (fond de zinc); — gilloté 401; — industriels 404; — machines 59; — monochrome 314; — noir 382 (fond rouge, blanc); — parties inutiles 341 (suppression); — et perspective 82; — sur pierre 404; — place 90; — à la plume 393, 403; — positif 280 (droit, retourné); — reproduction : impr. lith. 341, 404; phogravure sur bois 393; zincographique 413; — retourné 404; — rotation 78, 166 (rapide), 168, 173; — système périodique 98; — traits 333 (gros), 393; — transport 307; — un 84 (suffisant); — utilisation 325; — sur zinc séché 413; — 73, 83.
Détrempe 206.
Développement : à l'acide gallique 309; — après 270, 314; moulage 319, 321; — avant 286; — à la benzine 400; — à l'eau : chaude 314, 321, 385; froide 318, 319; à 40-50° 315, .., 317, 321, 322; — à l'essence de térébenthine 398, 415; — ferrotypie 294; — lent 295; — papier calotype 292; — au pinceau 318; — plaques : à l'albumine 295; au collodion 291; au gélatinobromure d'argent : bain coloré 320, acide pyrogallique 273, — oxalate ferreux 273, 277, 282, 283, — possibilité 277, révélateur (choix) 274, 276, 344; — simultané 294; — à la vapeur : d'eau 338; d'iode 326, 337, 338; de mercure 326, 327, 337, 338.
Déviation : acquise 66; — côtés 102 (angles); — strabisme 65.
Dextrine 308, 313.
Diamant 18 (traits), 414 (et strass : adhérence).
Diamètres : correspondants 56 (disposition); — des cylindres 101; — disques 24 (lunette), 55 (fusion); — noir 55 (près horizon); — rétiniens 56; — verticaux apparents 55.
Dianégatif 292.
Diapasons : période 185 (manipulation); — vibrations 165, 172, 176.
Diaphanie 411.
Diaphragme : ouverture, d'aire connue 114; variable 112, 114; — et pose 279; — 113.
Diapositifs : colorés 77; — par contact 361; — deux 86, 180 (application); — pour projection 288; — retourné 281; — trois 342, 402; — 89, 279.

Diderot 37, 41 (Lettre sur les Aveugles), 42.
Didot : caractères 387, 388; — point 387.
Diffraction : franges 234, 287; — n'intervenant pas 400; — et irradiation 20, 21 24.
Diffuseurs : employés 104; — murs des maisons 163; — orthotropes 106 (non) 155, 157 (exemples), 286.
Diffusion : voy. Cercles, Ecrans, Photomètres; — poudres 216; — réflexion transmission, 155, ., 157, 226, 287; — substance diffusante 108.
Dimensions des objets 59 (absolues, apparentes), 73 (vraies et perspective), 75 (modifiées).
Diplopie : confusion supprimée 50; — croisée (inverse) 46, 47, 55, 60 *bis*, 69 (en vision monoculaire alternante); — évitée 52, 78; — expérimentale 47; — homonyme (directe) 46, 47, 55, 60 *bis*, 69; — non négligeable 54; — remplacée par relief 62; — rétablie 78; — supprimée 70.
Directions : Voy. Cercles, Cônes; — de diffusion 155; — diverses 104 (émission); — donnée 104; — d'émission 104, 148; — fixes 171; — ligne visuelle 26 (extérieure), 27 (quelconque), 47 (déplacée), 68, 69 (changement : non conscience); — moyenne 104 (cône), 156 (d'incidence); — primaire 29, 29 *bis*, 29 *ter*; — Voy. Yeux.
Dispersion : introduction 225, 237; — Voy. Lentilles; — loi 122, 237; — des prismes 226.
Disques : bords flous 266; — Voy. Carton, Diamètre; — éclairage instantané 262; — éclairé 24 (derrière, devant); — figuratif 25; — plat : soleil 153, 158, 159; Voy. Sphère; — tournants : colorés 211, 239, 246; denté 186; double 193; Voy. Eclairement; entaillés 182; lourd (assez) 185; mince 184; Voy. Noir, Phénakisticope; roue à couronne 171; à secteurs 190; sensation 164; solidaires 183; transparents 172 (celluloïd, verre); à trous 77, 190, 328, 332; 117, 118, 173, 191, 194, 212, 214, 215, 217, ., 219, 257, 260, 265, 269; — Voy. Vénus; — App. V.
Dissociation : convergence et accommodation 80; — nécessaire 94 (groupe de sensations); — relief et position absolue 78.
Distances : absolues 61, 76, 78, 98; — angulaire 16 (tache jaune et punctum cæcum); — apparente 81, 91; — appréciation (estimation) 59 (causes d'erreur), 60 (image virtuelle), 60 *bis*, 61, 76, 91, 96 (et accommodation), 97 (horizontales, verticales), 98; — Voy. Binoculaire; — carrés 106; — changement 60 *bis* (perception), 75 (points de vue, perspectives); — comparaison 26; — connue 60 *bis*; — Voy. Conscience; — et éclairement (photomètres) 106, ..., 110; — focales 78, 83, 90; principale (lentille) 111, 400; — des foveas aux points correspondants 55; — indéterminée 78; — et irradiation 23; — Voy. Monoculaire; — des objets 59, 93, 96; — perception (évaluation) 37; — Voy. Points; — principale 1, 12 (choix), 73; — relatives 60, 61, 78; — sources aux surf. éclairées 105; — variables 88; — variations 76; — et visibilité 15 *bis* (carré); — Voy. Vision.
Doigts : croisés 93 (bille roulant); — éducation 40; — lecture 39; — mouvement relatif 60; — peau 42 (index, médius); — position 36 (et lettres), 60 (actuelle, antérieures, relative); — pouce 42, et index 60 (yeux fermés); — pression sur bord d'un œil 47; — et toile métallique 98; — 60 *bis*.
Donders : loi 29; — 44.
Dongier 347.
Dosages : chimiques 347, 348; — physiques 348.
Dove 92, 228 (appareil).
Draper 133 (méthode).
Droites : associées 79; — correspondantes 55, 58 (parallèles sur rétines); — horizontales 102; — horoptère 53, 58; — lumineuse 174 (tournant : mouv. unif.); — méridiens 51 (rétine : correspondance); — obliques 102; — perspective 1 (objet, image; fuyantes, principale, de front); — segment 26 (division), 28 (égalité); 29 *ter* (brillant sur fond obscur); — du sol 56; — de visée 29 *ter*; — visibles (bien) 253; — vue simple 57.
Ducos du Hauron : photographie des couleurs, par soustraction 339 (principe), 340 (technique); par addition 342 (Cros), 402; méthode pigmentaire (Lumière) 344, 345.
Dufour (Opéré de) 37 (1875), 38.
Duhem 349.
Durée 31 (passée, à venir).
Dynamo : petite 185, 186.
Dynamomètre : Voy. Mascart.

E

Eau : acidulée 290, 307, 324, 331 (faiblement), 332, 404, 407, 415; — adhérence 414; — bouillante : Voy. Cube; — chaude 302, 314,.., 317, 321, 385, 417; — distillée 271, 272, 284, 285, 291,..., 295, 298, 300, 302, 305, 307, 313, 320, 326, 335, 344; — forte : Voy. Gravure; — froide 307, 315, 317,.., 320, 322, 324, 326, 386, 417; — gommée 206, 207, 294, 308, 309,

404, 407; — glycérinée 18; — indice 216; — potassée 397; — régale 299; — sucrée 324; — vapeur 338, 352, 354; — 296, 297, 308, 318, 321, 323, 325, 327, 330, 334, 351, 356, 357, 372, 393, 399, 403, 406, 413, 415, 416, 418.
Eblouissement 15 et acuité), 192, 252.
Ebonite 89 (feuille mince), 290 (crochet).
Ebranlement nerveux 33.
Ecarlate : Voy. Rouges.
Echauffement 152 (hypothèse), 156 (compensation).
Echelle : de grandeur 59; — des intensités 119 (peinture : transposition); — de proportions 3; — des teintes (Newton) 227 (complémentaires), 242.
Echoppe 380.
Eclair 191 (durée très courte).
Eclairage : 135, . — ., 147; — Voy. Acétylène; — artificiel 161, ., 163; — constant 194; — et couleurs 233 (aspect); — différents (très) 116 (et détails); — diffus 161; — diurne 158, .., 161; — des écoles 162; — des espaces étendus et découverts 163; — instantané 60 *bis*, 262; — intensité 214 (idée); — par liquides vaporisés 146; — monochromatique 330; — privé 132; — projets 132 (néfastes); — public 132; — par transmission 215; — uniforme 226; — des wagons 145.
Eclairement : actuel 369; — et acuité visuelle 15; — et agitation 369; — Voy. Aire; — alternatives 366; — analogie 149; — antérieurs 369; — apparent 193 (discontinu); — augmentant 360; — cessant 328; — et champ 23 (irradiation); — d'un cliché 362 (et mesure du noir); — connu 277, 370; — constant 369; — courbe 21; — croissant 190 (et papillotage); — définition 104; — deux 132 (blanc, coloré : comparaison), 362 (égalité); — et disque tournant 117, 194; — en divers points d'une salle 114; — et éclat 104, .., 107, 110, 158; — égalisation 105, ..., 109, 111, 134; — égalité 134, 265 (ligne de délimitation); — par étincelle 118; — faibles 116, 127, 161, 366; — et f. é. m. 330, 332; — grands (intenses) 17 (instantané), 116, 127, 363 (courbe des noirs), 366; — inégalités 95; — influence 359; — interruptions 347; — latéral 287; — maximum 170; — mesure 330 (actinomètre électrique); — minimum 170; — modifié 365; — moyens 15 *bis*, 118, 161, 192 (et rétine); — et noirs 361, 365, 366; — Voy. Objets, OEil : sensibilité; — optimum 161 (personnel); — dans pénombre 400; — période 328; — périodique 329, 369; — en raison inverse du carré de la dist. (photométrie) 106, ..., 110; — réels 119 (étoffe blanche), 163 (illusion); — et résolubilité 24; — surface terrestre 158 (soleil), 160 (lune); — uniforme 20, 178; — variable 20, 116; — variation 105, 265 (discontinuité).
Eclat : apparent 161; — et couleurs 119, 263; — couronne 117; — définition 104, 148; — différence 116 (appréciation), 118 (disparition), 134; — diffusif 155, 156; — et direction : d'émission 104, 148; de diffusion 155; — Voy. Eclairement, Etoile; — fixe 151; — intrinsèque : comparaison 105, 113, 124, 132; égalité 105, ., 107, 113, 114, 132, 161; et intensité 104; — et irradiation 23; — Voy. Lune; — modifié 116; — moyen 164, 171; — Voy. Soleil; — source lum. 15 *bis* (visibilité); — uniforme 164; — unité 118; — variable 133.
Ecrans : atténuant 345; — blanc 116, 130, 214; — colorés (trois) 340, 342, 344, 345, 402; — déplacé 46; — dépoli 143 (gradué); — diaphragmant lentille 86; — diffusants 109, 112, 114, 133; — éclairé 182 (éclat); — d'éclairement 118; — élémentaires 344; — jaune 344; — de même teinte 105, 134; — métallique 276; — noir 231, 337 (à trous), 364; — noircis 60 *bis*; — opaques 279, 283, 333, 344, 361; — petits 283, 361; — petits 283, 361; — protecteurs 282; — et sources 111; — translucide 106; — avec trou 60, 190, 193, 225; — unique 77; — vertical 76; — 104, 107, 113, 158, 217, 226, 259, 262, 330.
Ecriteaux à caractères saillants 36.
Ecriture : à l'envers 404; — problème 39; — sur le zinc séché 413.
Edition et Tirage 391.
Education : acquise 26, 48; — aveugles nés 39; — des bêtes 30; — bien faite 93; — Voy. Couleurs; — et degré d'innervation 28; — Voy. Doigts; — due au toucher 37 (relief, distance); — et erreurs 214; — et fusion des deux champs visuels 44; — et interprétation 11 (perspective correcte), 59 (sensations actuelles); — inutile 40; — même 94 (locutions et représentations); — et mémoire 40; — nécessaire 44, 73; — négligée 40; — Voy. OEil; — particulière 62; — préparée 44; — rapide 44, 70; — Voy. Yeux.
Effaçage : gravures 372 (burin, pointe sèche).
Eglise 12 (intérieur : représentation).
Egouttoir : porte-glace 307.
Egyptien (**Caractère**) 388.
Eléments : distincts 94; — Voy. Rétine; — superficiel 104 (source lumineuse).
Elévation 2 (projection verticale).
Elster : Voy. Joly.
Elzévir (**Caractère**) ou Romain 387, 388.
Email 157 (dépoli), 307, 323, 324 (émaux : blanc, colorés, noir, photographiques).

Emeri calciné 336.
Emission 148, .— ., 154; — continuité 104 (et direction); — quasi normale 105.
Empattement 387.
Empiristes : 41 (physicien non empiristique); — théorie 30, 52, 56; — vision binocul. 44.
Empreinte : en creux 391; — rouge 404 (sur pierre).
Emulsion de gélatinobromure d'argent 271, 287, 344 (panchromatique).
Encéphale : Voy. Cerveau.
Encrage : après 372 (essuyage); — avant 413 (mouillage); — à chaud 397; — lithographique 397; — mécanique 394, 396; — au rouleau 403, 407, 408, 416 (de gélatine), .., 419; — taille-douce 374 (à la main : tampon, planche; mécaniquement), 379 (à la poupée), 394; — 384, 398.
Encre : d'aniline 418 (concentrée); — bourrée 375, 378, 394; — de Chine 116 (étendue), 180 (traits), 196, 206 (lavis), 225, 276 (échelle de noirs), 279, 371, 381, 398; — épaisseurs 395; — filtrant 419; — grasses (lithographiques) 312, 341 (fixable), 373, 397, 398, 403 (composition), ..., 407 (noircie), 409, 413, 415, ., 417; — d'impression (d'imprimerie) 333 (réserve), 341, 373, 403, 406, 407, 415, 416; — de Lemercier 403; — opaque pour rayons actiniques 279; — ordinaire 404; — photoglyptique 321; — production 309; — à report 398, 399, 406, 412, 418; — réserve 416; — retenue 407; — rouge 220; — spéciale 397 (gillotage); — transparente 403; — typographique ordinaire 418; — verte 220; — 16, 18, 39, 44, 393, 419.
Energie : absorbée 351 (forme); — se conservant 104; — émise 104; — expression 151 (et forme des corps); — hypothèse de la conservation 105; — et inversion 365, 366 (alternatives; expér.); — et lumière 104, 349, 351; — lumineuse 349 (et effets produits); — Voy. Quantité, Radiations; — et réaction 349; — reçue 104; — répartition 367.
Enfant : avant naissance 40; — de Cheselden 37; — louchement brusque 67; — Voy. Nouveau-né; — objets et bouche 42; — sourd-muet aveugle 34; — vision indirecte 54.
Eosine 277, 320, 330, 382.
Epaisseurs : caractères typograph. (largeur) 387, 389; — mesure 42.
Epingle 46; tête en verre 165 (grosse), 185 (éclairée).
Episcotister 191 (à trois disques), 193 (double disque), 194.
Eponge mouillée 341, 408, 410, 413.
Epreuves : artistiques 374; — aspect dépouillé 372; — avant la lettre 372; — au charbon 270, 321 (tirage mécanique), 339, 340 (trois), 370, 386; — colorée 339 (transparence); — coloris 379; — droite 316 (positive retournée); — à l'encre de report 406; — d'état 372; — d'imprimerie 39 (à la brosse), 394 (humides); — inégales 379; — lithographique 397; — lumières 342; — modelées 315; — monochromes 339; — noirs 415; — stéréoscopiques 88, 89 (montage), 90 (observation); — superposées 318; — au trait 315; unique 345 (visible par transparence).
Equilibre : conditions 353 (modifiées : lumière); — états 349; — métastable 349, 353.
Erreurs : acquises 33 (superposées, systématique); — Voy. Angles, Appréciation, Couleurs; — sur dimensions des objets 101; — Voy. Education; — grossières 39, 96 (sur distances); — de jugement 132, 269; — de localisation 33 (sensations); — Voy. Pointés; — sur position de la tête 100; — Voy. Sens.
Erythrosine 330.
Espace : des aveugles, brachial, 42; — idée 36; — image 18; — manuel 42; — notion 38, 42 (acquisition); — perception 41; — tactile, des voyants, 42.
Esprit privé d'idées 31.
Essence : de citron 381; — de térébenthine 381, 382, 385, 398, 399, 408, 411, 415, 416; — 315.
Essuyage 372, 374 (difficulté; — à la main : chiffons; — mécaniquement : cylindres), 375, 377, 407 (inutile).
Estimation : Voy. Angles, Distances (appréciation), Grandeurs, Normalité, Parallélisme.
Etain : d'une glace 24; — planches 380; — 390, 392.
Etat : alternant 49 (antérieur), 64 (strabisme); — d'eau-forte 376.
Etendue : colorée 32, 41; — idée 36; — notion 41.
Ether : évaporation 290, 377; — sulfurique 289; — 306, 324, 415.
Etincelles électriques : éclairantes 184, 185 (durée), 262; — éclatant 60 *bis*; — 118 (intensités lum. relatives; durée et conditions de la décharge).
Etoffes : Voy. Bandes; — blanche 119 (éclairement réel : plein soleil, clair de lune); — imprimées 396.
Etoile : double 15 (résolution); — éclat 115; — images 18; — irradiation 19 (crépuscule, nuit).
Euler 97,
Excitations : actuelle 187; — antérieures 187, 190 (et rétine), 192; — constantes 188; — et fatigue 255; — fortes 192; — locales 93 (et réalité); — momentanées

188; — moyenne 189, 193; — d'un nerf 22 (intense); — rapides 189 (périodiques); — Voy. Sensations; — de très courte durée 188, 193 (et sensation globale); — variable 189; — voisines 22.

Expériences : Voy. Abney, André et Wolf; — antérieures 59, 93 (imposant interprétation), 94; — apprentissage nécessaire 80; — Voy. Arcy (d'), Becquerel, Billet, Bouasse, Broca, Brücke; — certitude 37; — Voy. Charles II, Colardeau; — collective 44, 56; — cordes rectangulaires 176; — de cours 231 (lumière : addition); — croisées (cruciales) 30, 358, 362; — diplopie 46, 47; — Voy. Energie; — faisceaux lumineux 225 (groupements différents); — Voy. Faraday, Fatigue; — faussée 37; — fils 176; — fondamentales 127 (phén. de Purkinje), 258 (contraste), 270 (à répéter); — fusion des images 48; — Voy. Glace, Helmholtz; — héréditaire 44; — images persistantes (accidentelles) 252, 253 (rot. de l'œil); — individuelle 44; — innervation et contraction 28; — Voy. Inversion; — irradiation 19, 22, 23; — Voy. Javal, Listing; — loi de Lambert 151 (forme des corps); — Voy. Masson, Melde, Melville; — mesure de longueur 26; — Voy. Moser, Niepce; — page de chiffres 28 (copie); — Voy. Paul Bert; — personnelles 30; — pianiste 28; — Voy. Picard, Plateau; — relatives 156; — roue et palissade 174; — Voy. Stéréoscope, Stroboscopie, Sulzer; — thermophonie 329; — Voy. Villard; — vision binoculaire 45, 267 (couleurs); — vulgaire 62, 73, 116, 120; — Voy. Waidelé, Wheatstone, Wundt, Zöllner.

F

Fac-similé 406.

Facteur : d'intensité 237 (couleur), 238; — d'oubli 187, 189, 190 (pratiquement constant; et sensation moyenne), 191 (éclair très court), 192 (éblouissement); — de réduction (coefficient) 1, 3, 158, 242.

Facultés : des aveugles 40 (ordinaires); — intellectuelles, sensorielles, 41.

Faisceaux : calorifique 276 (intensité); — colorés (addition) 221, 248; — Voy. Courbes; — de droites 178, 180; — d'hyperboles 29 *bis*, 29 *ter*; — intensités : constante 152 (échauffement; mesure); égales 121 (convention); égalité 126, 130; inégales 122; modification 124, 125; rayons sensiblement parallèles 104; — lumineux : colorés (étude objective) 225, . — ., 231; constant 276; intensités et effets 350, 362, 365, 366; intermittent 329, 332; interrompu 367; monochromatique 276; périodique 164, 224, 328; et solution (mélange) 351; — pouvoirs éclairants 130 (égalité : définition).

Faraday : expér. 171 (roues), 186 (stroboscopie).

Fatigue : 180; — œil (rétine) 188, 192, 193 (expér.), 194, 245 (points), 252, 255 (rôle), . , 258, 264.

Fechner : expér. 255, 269; — et Helmholtz 252 (théorie); — loi 20, 26, 115, 116 (expér.), 117 (vérification). ., 119, 129 (et phén. de Purkinje), 131, 187, 188.

Fenêtres : égales 231; — images fusionnées 86; — ordinaires 112 (fermeture); — en regard 276.

Fente : à bords mobiles 112, 130, 191; — déplacée 121, 122; — éclairante 130; — éclairée 107, 121 (blanc objectif), 124 (par deux sources); — équidistantes 173; — dans lame métall. 19; — mobiles 168, 173, 174; — oculaire 124; — rectiligne 173; horizontale 175, 194; — d'un spectroscope 210, 225; — trois 226, 238 (même larg.); — 113, 237, 242, App. V.

Fer : blanc (tube) 334 (expér.); — Voy. Chlorures, Citrate; — couche 372 (mince), 416 (dépôt sur zinc); — déchets 303; — disque 328; — Voy. Ferricyanure, Ferrocyanure; — limaille 303; — Voy. Oxydes; — rouleaux 374; — Voy. Sels; — à souder 146; — Voy. Sulfates.

Ferricyanure : ferreux 303; — de potassium (prussiate rouge) 288, 300, 302, .. , 305, 312, 320.

Ferrocyanure de potassium (prussiate jaune) 300, 303, 304, 308, 312, 393.

Ferrotypie 294.

Féry 400 (réseau : ombres).

Feuilles : d'acier 321; — d'aluminium 329; — d'amiante 328; — de caoutchouc 412 (impression; grandissement); — conductrices de la chaleur 329; — de cuivre 329; — d'étain 108, 322; — minces 108; Voy. Carton, Celluloïd, Ebonite, Gélatine; — de papier 108 (tache), 258 (rouge, verte), 259, 291 (superposées), 403 (impression lithogr.), 409 (mise en place), 418; — de platine 329; — de plomb 321; — de zinc 321, 329, 413, 416.

Feutres interposés 39, 418.

Figures : architecturales 102; — difforme 173 (genre d'anamorphose); — identiques 173 (aperçues simultanément); — inaltérées 75; — Voy. Lissajous; — planes 280 (symétrie); — redressées, renversées, retournées, 280; — translation circulaire 177; — tournant rapidement 185.

Fils : d'acier 176 (noirci); — enfilé 42; — fin 19 (et flamme), 21 (blanc, noir); de réticule 24, 60 (et image); — images 98 (fusion); — à plomb 55; — radiaux 412

raccourcissement); — système 179 (deux); — tendus 26, 41; — vertical 60 *bis* (noir sur fond blanc), 87.
Fixage 272, 275, 276; — 291, 292; — 294, 295, 297, 299, 327, 333; — 342, 344.
Fixatifs 207.
Fixation 14, 17, 26, 29, 37, 46, 52, 55, 58, 64, 70, 79.
Fizeau 336, 338.
Flamme : auxiliaire 146 (veilleuse); — bougie 137 (régions), 163, 266; — constitution 137; — continue 144 (circulaire); — fuligineuse 137, 147; — hauteur 114, 143; — incolore 147; — jaune 250; — lampe 19 (fil fin, règle), 137, 141 (à pétrole), 143 (Hefner), 255; — dans lieu obscur 19; — lumineuse 137; — non éclairante 137; — propriétés photochimiques 354.
Flan 391.
Flou artistique 279, 281.
Fluorescéine 277.
Flux lumineux 112.
Fond : blanc 170, 171, 176, 255, 339 (regardé à travers couches colorées), 382; — bleu 267; — brillant, éclairé, 166; — gris 172, 416; — miroitant 326; — noir 170, .., 173, 194, 255, 326, 416; — Voy. Objets; — obscur 25, 176; — préparation 404; — rouge 258, 267, 382, 384; — sombre 266 (espace lumineux); — vert 258; — de zinc 416.
Force : centrifuge 383; — électromotrice : et éclairement 330, 332 (actuel); mesure 331; production 330 (par lumière); très faible 332.
Formes : des corps 151 (impossibilité); — dessinée, déterminées, 41; — distinction 194 (durée nécessaire); — générale 58 (horoptère); — des Objets 59 (et dimensions), 73 (connaissance antérieure), 77 (exacte : ignorée), 87 (connue), 93; — Voy. Reproduction : procédés; — de la rétine et de l'image 43 (invariable); — sens 194 (image rétinienne); — typique 389 (caract. typogr.); — Vision : perspective 1, . — ., 1[illegible]; monoculaire 14, . — ., 29 *ter*; monde extérieur 30, . — ., 43; binoculaire 44, . — ., 72; perspectives conjuguées 73, . — ., 92; illusions visuelles 93, . — ., 103; — App. I.
Formol 285, 318.
Foucault 24 (irradiation astronomique).
Fourier 189 (théorème).
Fourneau : d'émailleur 324; — 383.
Fournier 387 (ancien point).
Fovea : auxiliaire 52; — centralis : et acuité 17; correspondance 51, 52 (innée), 53 (superposition), 61; et points correspondants 55; 14, 15, 18, 26, 28, 29 *ter*, 46, 48, 54, 62, 68, 69, 71; — vicariante 52, 69.
Franges : Voy. Diffraction, Fresnel, Interférences, Moiré (seconde espèce), App. III.
Fréquence : différences 241, 242; — Voy. Noir; — et papillotage 189, 190; — App. II.
Fresnel : formules 156, 158; — franges 227; — polarisation chromatique 242; — prismes 183; — théorie 228.
Fresque : peinture 199, 208.
Froid : sensation 34, 35, 94 (serpent).
Front : Voy. Droites, Lignes, Plan, Vision.
Fuchsine : Voy. Rouges.
Fusain 207, 371 (dégradés).
Fuite : Voy. Ligne, Point.
Fusion des images : approchée (gênante) 49, 50; — binoculaire 71 (images identiques); — brusque 78; — disparates 62; — et exercice 65; — facilitée 80, 98 (papiers peints); — de fils différents 98; — impossible 79 (image neutralisée); — par louchement fort 68; — maintenue 71, 78; — nécessaires 72; — d'objets identiques 71, 92 (comparaison); — parfaite 49 (impossibilité); — stéréoscopique 61 (sans stéréoscope), 86 (courbes); — successive 79; — tendance 48, 49; — voisines 61.

G

Gagneau 139 (lampe).
Galilée : irradiation 19 (lois); — lunette 63 (double).
Gallée 392.
Galvano : Voy. Clichés.
Galvanomètre : aiguille 152 (assimilation : pendule); — balistique 276; — déviation 156, 189; — sensible 330 (voltmètre), 331.
Galvanoplastie 319, 322, 381, 391, 416.
Gamme : continue 120 (radiations simples : lumière); — sens divers 232.
Garance 204.
Gaufrage 39.
Gaz : dégagement 349 (solution sursaturée); — à l'eau 144; — d'éclairage Voy. Bec; composition 144.
Gélatine : accolées 279, 281, 316; — alunée 316; — bichromatée 282, 312, 316, 319, 321, 341, 381, 385, 386, 417; — et bromure d'argent (émulsion) 271, 273, 278; — Voy. Colle; — colorée 217 (rondelles), 219 (préparation), 339, 340; — couche 302, 315, 322, 339, 340, 417; — durcie 285; — emploi 311, . — ., 322; — enlevée 288; — feuille 219, 281 (mince); — fine 311; — gonflée 319; — et halo 286; — imperméable 282, 320; — insolubilisation (tannage) 288, 312, 314, 316, 319; — Voy. Lithographie; — métallisée 319; — mince 339; — obtention 311; — et œil 280, 281; — perméable

282, 320; — photographique, propriétés, 312; — rôle 348; — substituée au collodion 293; — solubilité 312; — solution 278; — teintée 286; — utilisation 288, 320; — 89, 206, 208, 210, 211, 296, 298, 308, 317, 321, 323, 327, 385, 403, 416, 418.
Gélatinobromure d'argent : Voy. Emulsion, Papiers, Pelliculage, Pellicules, Photographie, Plaques.
Gélatinochlorure d'argent 298.
Géométral (Plan) 1, 2, 3.
Géométrie : non euclidienne, et Physique, à quatre dimensions, 41.
Gillot, Gillotage, 397,
Glaces : argentée 326; — auxiliaire 89; — dépolie 307; — deux 292; — à enduit noir (au dos) 156, 158, 286; — épaisses 276, 297, 417; — à faces parallèles 362; — mince 24; — et modèle 404; — et mouvements 94 (peintres et toiles); — négresse, singes, 11; — opaline 110 (mobile); — et papier 336 (expér.); — parallèles 330; — pile 228; — plaques 290, 295, 316, 317, 322, 323, 338, 383; — planes 400 (jamais); — sans tain 97 (lune à l'horizon), 116, 120, 225 (opaque), 228, 342 (trois); — talquée 219, 321.
Glacis 205.
Glissement 29 (cercle mobile sur cercle fixe).
Globe : et cube 38; — de l'œil 27 (et muscles), 28 (mouvement inexistant).
Glucose 313, 323.
Glycérine 325, 417, 418.
Gomme : arabique 318 (papier), 323, 403, 410 (colle), 413, 416; — bichromatée 318; — de caoutchouc 404; — gutte : Voy. Jaune; — insoluble 318; — laque 207, 294 (vernis), 321, 330, 403; — maligne 309; — 293, 308, 312, 325, 404.
Gothiques (Caractères) 387.
Gouache : 206; — sur miroir 326 (image).
Goût 30, 32, 34, ., 36.
Gouttes : noire 25; — veine liquide 171 (vision); — sur verticale 184.
Govi 124 (spectrophotomètre).
Gräfe (Von) 49.
Grain : d'amidon 165; — Voy. Couche; — fécule de pommes de terre (teints) 344, 345; — fin 106, 295 (extrêmement), 372 (solide), 403, 407 (serré); — formé 375; — gros 294, 403; — grossiers 328; — irréguliers 376; — noirci 401; — Voy. Papier; — régulier 106, 378 (création); — réserve (cuisson) 377, 386; — et sensibilité 277 (plaques); — serré 332, 336; — et traits 404; — usé 375; — 271, 276, 278, 287.
Graisse 136, 405, 414 (absence).
Grandeur : estimation incorrecte 101; — voy. Images; — des Objets 60 (inconnue), 79 (et efforts musculaires), 81 (apparente, invariable, réelle), 96 (vision monoculaire; erreurs), 97 (lune à l'horizon), 101 (principe d'Helmholtz).
Grandissement 412.
Grattoir 372 (barbes; — effaçage), 405.
Gravure : à l'aquatinte (lavis) 377; — sur bois 393, 397 (trait), 398; — au burin 319, 372, 393 (inversée); — en creux (musique) 380, 406; — à l'eau-forte 319, 376, 377 (légère), 378, 381; — image 338 (sur la glace); — insolée 333; — manière noire 375, 405; — au mercure 325; — mi-insolée 333; — obtention photographique 416; — Voy. Photogravure; — sur pierre 407; — à la pointe sèche 372; — en relief 395; — au trait creux 384 (couleurs : obtention); — Voy. Verre, Zinc.
Greffe animale 33 (rat : queue).
Grilles : Voy. Baguettes; — mobile 39; — planes identiques 178.
Gris : clair 409; — courbe 172; — égaux 164; — espace 170, 214 (cercle); — foncé 409; — Voy. Fond; — identiques 246; — de l'image 400; — intense 364 (noir min.); — normal 401; — nuancé 260; — objectif 195; — obtention 246; — quelconque 212 (modifié), 213 (valeur connue); — subjectif 195; — uniforme 164, 257, 265; — 269.
Grossissement modifié 63 (accru), 90.
Guides convenables 39 (aveugles : écriture).
Gutta : moule (empreinte) 319, 391.
Guyard 357 (iodure d'azote : décomposition).

H

Habillage 374 (texte et illustrations).
Habitude : convergence et accommodation 48; — et interprétation utile 94 (sensations); — de juger 31, 33; — des mouvements 34.
Haleine 336, 337.
Halo photographique 286.
Haüy 39 (Valentin; — René).
Hefner : lampe à l'acétate d'amyle 114, 143.
Helen Keller 36.
Hélices 99 (mouv. relatifs).
Héliographie 382.
Héliogravure 374 (cylindres de cuivre gravés extér.), 381 (au trait).
Hélioplastie 319, 320.
Héliostat 156.
Héliotypie : Voy. Photocollographie.
Helmholtz : champ visuel obscur 256 (clarté); — couleurs complém. 240, 242, 251; — disque tournant 257; — distances absolues 76; — éducation et champs

visuels 44 (fusion); — expér. 60 *bis*, 244, 264; — Voy. Fechner; — impressions 164 (continue, intermittente); — irradiation 20, 22, 23; — Voy. Képler; — lune à l'horizon 97; — Optique physiologique 31, 44, 58; — papillotage supprimé 190; — principe 101 (et illusions); — problème des deux tableaux 119; — sensations 30 (et intelligence), 41 (et images), 43 (visuelles), 189 (et excitation périodique : comparaison); — téléstéréoscope 63, 82, 88; — vision binoculaire des couleurs 267; — 11, 42, 90, 243.

Hérédité : influence 30, 52 (idées actuelles), 56; — et vision binoculaire, 44, 47.

Hering 30.

Herschel 349.

Holtz 262 (machine).

Homme 15 (1m,75 à 1 km : 1'), 94 (mouvements, allure).

Homogénéité cristalline 227.

Homothétie 75 (centre, rapport).

Horizon : 1; — choix 12; — diamètre noir 55; — et grandeur de la Lune 97; — Voy. Lignes, Plans, Points; — rétiniens 29, 51 (définition), 53 (superposition; glissement), 55 (coïncidence), 56; — et soleil couchant 62; — 73.

Horoptères 46, 53 (de Muller; problème), 58 (de droites; forme générale; de points), 62.

Howe (Docteur) 36 (institut d'aveugles).

Huiles : de colza 140 (épurée), 373; — — cuite 373; — dépense 140 (et intensité lumineuse); — grasses (amande, olive, ...) 373; — de lin 373, 409; — mécanisme amenant 139 (lampes); — Voy. Peinture; — siccatives (chènevis, noix, ...) 373; — tache 108; — Voy. Wells; — 137, 393.

Hydrogène : 336; — et chlore 349, 354, 355.

Hydrotypie 320 (procédé Cros).

Hyperboloïde à une nappe 58.

Hypermétropie 23 (variable).

Hyposulfite de sodium 272, 275, 284, 288, 291, 292, 297, 300, ., 302, 320, 326, 327.

I

Idées : acquisition 35; — de l'avenir, de causalité, 31; — de déterminations simultanées 32; — de durée passée 31; d'étendue 32; — des meubles 42; — du mouvement 38; — du nombre 31; — préconçue 94 (influence); — privation 31 (esprit); — en puissance 30, 31, 35; — de relation 36; — de rétine 43; — de situation 38; — de succession 31.

Illumination (Effet d') 163.

Illusions : acquise 11; — colorées 258, . — ., 269; — détruite 87; — d'optique 175 (expér. de Zöllner), 177 (par mouv. de transl. circul.); — tactile 42; — visuelles 93 (nature), 94 (circonstances), .., 97 (lune à l'horizon), 98 (distance), 99; estimations 100, ., 102; relief 103; — App. V.

Images : accidentelles 14, 29 *ter*, 62 (distinctes), 194, 245; 252; . — ., 269; — aérienne 194 (discontinue); — agrandies 287; — annulée 66; — Voy. Apparitions; — associées 32; — et aveugles 41; — blanche 262; — catoptriques 93; — cause 326; — Voy. Chambre noire; — chromolithographiques 411; — clairs 400; — coïncidence 87; — colorée 262, 342, 344 (négative complémentaire de l'objet; positive, couleurs de l'objet); — comparaison 28; — au contact 338; — cornéenne 65; — cylindrique 86; — Voy. Daguerrienne; — déformée 86; — déplacement 48, 82; — dessinée 11 (convention); — Voy. Développement; — différentes 78 (sensation); — dioptriques 93; — Voy. Diplopie; — directe 69; — disparates 62 (fusion); — distinctes 337; — doubles 164 (se recouvrant); — durée 194; — étendues 41; — étoilées 18; — formation 41; — Voy. Fusion; — grandeur 13 (absolue), 81 (invariable, variation), 96 (apparente : croissante); — gris 400; — identiques 71 (fusion binoculaire), 93; — immobile 167; — imperfection 20, 287; — indirecte 52, 69; — à l'infini 80, 96; — intermittentes 193; — interprétation 59; — inversées 280; — inversion 342; — juxtaposées 113, 114; — latente 272 (invisible); sur papier 292, 333; — Voy. Miroir; — mobile 171; — négative accident, 252, 255, 256; — nette 400; — Voy. Neutralisation; — noirs 400; — non inversée 301 (obtention); — non permanente 77; — d'un objet lumineux 20 (correcte), 24 (disque éclairé), 60 (et réticule d'une lunette), 63, 91; — Voy. Perspective; — peu nette 86; — planes 71 (différentes); — Voy. Points; — ponctuelle 18; — positive accident, 252, 255; — rapprochement 49; — redressée 281, 294, 304, 317 (second transfert); — réelle 111, 113, 114, 194, 279; — en relief 321; — renversées 89, 280, 282, 344; — reportée 410; — Voy. Représentation; — répulsion 49; — Voy. Rétine; — retournées 280, 294, 304, 316 (positive), 326; — sanguine 313 (noircissement); — secondaire 338; — souvenir 41; — Voy. Spatiales; — stéréoscopiques 91 (deux), 268 (effet de neige); — superposition 86, 342; — synthétiques 41; — de la tache aveugle 16; — tailleur d'I. 393; — tertiaire 338; — de traits identiques 339

(trois); — transparente 327 (négative), 411; — transport 410; — triple 342 (projection); — Voy. Triplopie; — virant au bleu 300; — virtuelle 60 (distance), 63 (droite), 71, 83, 86, 111, 225; — visuelles 41, 47 (dédoublement), 48 (tendance à la fusion), 49 (répulsion), 50 (netteté), ., 52 (sur foveas), 53 (sur points correspondants), 54 (faibles), 55 (doubles), 60 *bis* (simultanées), 62 (différence actuelle), 68 (dissociées), 69; — Voy. Yeux.

Impression : consciente 41; — Voy. Contact, Couleurs; — définition 371; — directe (papier) 318; — Voy. Encre; — gélatine (ou glace : verre) en avant 280, 281; — lithographique 279, 341, 371, 403, 408 (à plat); — lumineuses : continue 164, éclatante 127 (rouge), faible 127 (bleue), Voy. Persistance, instantanée 164, intermittente 164; — à la main 418; — musculaire 41; — mutuelle 338 (images : corps voisins); — papier couché 374; — plaque sensible 279; — plusieurs presses 391; — procédés : creux 371, . — ., 386; relief 387, . — ., 402; — avec râteau 418; — remarques générales 371; — rétinienne 44 (interprétation par toucher); — d'un rongeant 396; — sans encre 39; — sur surface quasi-plane 403, . — ., 419; — tactiles 41; — taille-douce 371, 374; — trichrome 341; — typographique 279, 371, 380 (musique), 395 (conditions), 397; — zincographique 413.

Imprimerie : Voy. Caractères, Encre, Épreuves; — nationale 387 (point).

Incidence quasi normale 105.

Incolore (Substance) 219.

Indétermination absolue 73 (contredite).

Indicatrice d'émission 148, 155.

Indice de réfraction 125, 158, 216, 228, 265 (mesure : réflex. tot.).

Indigo, Indigotine, 204, 239.

Induction : 31; — photochimique 355.

Inertie rétinienne 194 (sens des formes).

Influence : de l'hérédité 30; — d'une idée préconçue, du souvenir, 94.

Innervation 27, 28 (degré, — et contraction), 67 (considérable).

Instruments d'optique (et irradiation) 24, 25 (ligament noir).

Intelligence : antérieure aux sensations 30; — Voy. Taine; — travail 41.

Intelluctus ipse humain 30 (formation), 44 (s'imposant).

Intensités : continue 117; — Voy. Couleurs; — définition 104 (source); — et dépense d'huile 140; — déterminable 121 (source blanche); — diminuant 130; — échelle 119 (transposition : peinture); — et éclat intrinsèque 104; — Voy. Faisceaux; — horizontales 138 (bougies réelles), 140 (étalon Carcel); — impressions instantanées 164; — incidente 156; — invariable 104; — lumineuse : constante 192, égales 370, intense 165, modifiée 243, et noir 370; et réaction photochimique 186, 347, 350, 355, 360, 364 (croissant), 366 (alternatives), 367 (variation brusque), 368 (remplaçables); et sensation 127, transmise 276, très faible 54; 188, 189, 209, 219, 328, 400; — moyenne 164; — non uniforme, notable (nécessaire), 20; — et papillo[illegible] 190; — picturales 119; — Voy. Radiations; — rapports 119, 121 (blanc), 219; — réelles 119; — réfléchie 156; — relatives 118 (étincelles élect.), 121 (radiations); — sources lum. : 15 *bis*; deux (comparaison) 105, ..., 109, 124, 191 (éclairs); — Voy. Teintes; — unités 121 (radiations), 238 (couleur); — variable 117 (périodiquement); — violettes 131; — Voy. Vision.

Interférences 178, 227, 234.

Interlignage, Interligne. 387, .., 390

Interprétation nécessaire 96.

Inversion : d'un cliché 363 (expér.), 364 (surexposition), 367 (et interrupti[illegible] 369 (et variables de la modificatio[illegible] mique); — Voy. Energie.

Iode : vapeurs 326, 331, 333, 337, 338; 357, 382.

Ioduration : de l'argent 326, 331, 382; — du collodion 289.

Iodures : d'amidon 333; — d'ammonium 289, 295; — d'argent 291, 293, 301, 326, 327, 382; — d'azote 357 (décomposition); — de cadmium 289; — de mercure (bi) 325, 416; — de potassium 292, 295, 301, 330; — de sodium 330.

Iris 95 (ombre du bord).

Irradiation : 19, . — ., 25; — effets 266 (représentés); — photographique 287.

Isochromatiques (Plaques) 277.

Italiques (Caractères) 387.

Ivoire 382.

J, K

Janssen 360 (loi de Becquerel).

Jaunes : de cadmium 200, 208, 221; — de chrome 120, 200, 212, 214, 217, 221, 246, 248, 340, 341; — citron (de zinc) 200; — coefficient 246; — des émaux 324; — émulsion 205; — fondamental 221; — franc 223; — gomme-gutte 205, 221, 222, 248; — indien 200, 221; — long. d'onde 120; — de mars 199; — de Naples 200, 221; — d'or 345 (fleurs); — orpiment 200; — poudre 205; — sodium 223; — de spectre 214, 250; — substance 216; — verdâtre 240, 250; — 379, 402, 409.

Javal : éclairage artificiel 161; expériences

60 *bis* (simple), 61 ; fixation 14, hérédité et vision binoculaire 44, lisibilité 389 (caract. typograph.); Manuel du Strabisme 44, 63; physicien 63, répulsion des images 49, stéréoscope 71 (à miroirs et charnières), strabisme convergent 67, yeux et sensation (provenance) 45.
Joly et Elster 108 (photomètre).
Joly (de) 343 (photographie des couleurs).
Journaux : clichage 391 (indispensable); — linotype 392 (mach. à composer).
Jugements : 33 (d'habitude), 35 (début).
Jumelle stéréoscopique, 63.
Jupiter 19.
Justification 390.
Kaolin 207, 418.
Képler : irradiation 20, 22, 23.
Kermès 204.

L

Laborde (Abbé) 334.
Lachelier 36.
Laines : colorées, classification (Gobelins) 223, 224; 250; — et toucher 40.
Lambert : loi 104, 148 (expression), ., 150 (applications), 151 (conséquences), 153 (exactitude, généralisation), 155 (diffuseurs orthotropes), ., 157 (et orthotropisme), 159 (et soleil), 160 (lune); — pyramide 222; — et Rumford (photomètre) 107, 127, 132.
Lames : absorbante 276 (homogène); — Voy. Argent; — de cristal de roche 333; — cristalline 240; — diffusante 134; — étalonnée 370; — à faces parallèles 115 (épaisseur variable), 240; — de laiton 39, 124 (noirci); — métalliques 19 (deux fentes), 139 (flexibles), 165 (acier), 330 identiques : dans électrolyte), 331; — mince 329 (verre argenté); couleurs 330, 346; — opaques 329; — transparentes (non conductrices) 329; — Voy. Verre.
Laminage 374.
Lampes : à alcool 146, 323; — à arc 158 (charbon positif : éclat); — Voy. Carcel; — d'émailleur, à essence, 146; — Voy. Flamme; — fixe 114; — fumant 141; — Voy. Gagneau; — à gaz 354; — Voy. Hefner; — à huile 137 (flamme), 139 (bec, mécanismes), 141 (mèche); — à incandescence 19 (charbon), 134, 191, 259; — Voy. Modérateur; — petite 114, 143; — à pétrole 127, 137, 141, 276 (mèche circulaire); — Voy. Vernon-Harcourt, Wells.
Langage 32 (acquisition).
Lanterne de projection 77 (deux), 231.
Lapis lazuli 202.
Laques : d'aniline 204; — de cochenille 204, 222, 239; — de garance 204, 221, 239, 340, 341; — de gaude, jaunes, 204.
Laure Brigman 36.
Lavis 206, 208 (substratum), 377 (gravure à l'aquatinte).
Le Bon 336.
Lecture : binoculaire 66; — Voy. Doigts; — pianiste 62; — problème 39; — d'un texte 161, 163; — vitesse 39.
Leibnitz 30 (activité propre de l'esprit), 44.
Lemercier (Encre) 403.
Lemoine (G.) 347 (action de la lumière), 351 (coeff. d'absorption), 369.
Lentilles : et accommodation 23, appropriées 82, axes 113, concave 134 (oscillante); convergentes 18, 71, 111, 156, 165, 167, 191, 214, 342; décentrées 90 (inutiles), deux 90; diaphragmées 112, ., 114, 156; de dispersion 111, Voy, Distances, divergentes 111, éléments différents 86 (images), inutile 210; Voy. Loupe, Ouverture; parties inutiles 83 (supprimées), plan convexe 18, position 231; de projection 112, 114, 143, 217; rôle 231, supplémentaires 90 (et grossissement), suppression 231, trois 342 (identiques); 225, 226, 329.
Léonard de Vinci 10 (usage d'une vitre), 12 (peintre : position).
Lettres : Braille 39, Voy. Diderot, distribuée 390; écartement 388, 389; à l'envers 387 (caract. typograph.), groupes 48 (fusion); hauteur (corps), largeur (épaisseur), 387, 389; levées 390, lisibilité 15; œil 387, 389; percées dans plaque métall. 45, à queues 387 (et majuscules), saillantes 36, vision 50; App. II.
Lésion généralisée 22.
Lesueur 39.
Leucoscope 251.
Ligament noir 25.
Lignes : bleues 77, de composition 392 (line of type), creuses 39 (sillons), de délimitation 265 (régions : éclairements égaux); droites 19 (interrompues), 41, 55 (rectangulaires); ensemble 41; de front 3, 6; fuyantes 1, 7; d'horizon 73, d'impression 387 (et bande de papier), justifiée 390, lecture 62 (pianiste), longueur 390 (justification), lumineuse 21 (mince), médianes 29, mobiles (Voy. Courbes : intersect.); noires 21, 22 (minces); à parcourir 40, points (six) 387, rouges 77; de séparation (disparition) 109, 110; série 401; de terre 2, 5, 6; tournantes 172, ., 174; de visée 29 *ter*, 51; Voy. Visuelles; vues simples 56, 57 (points d'intersection).
Linotypie 419.
Linotype 389, 392.
Liquides : colorés 228, combustion 137, vaporisés (alcool, essence) 146 (chauffage, éclairage).

Lisibilité : caract. typograph. 389, Voy. Couleurs, lettres 15.
Lissajous (Figures de) 165, 172, 176.
Listing : loi 29, 29 *bis*, 29 *ter* (vérification expérimentale), 53, 56, 253.
Litharge 198, 334.
Lithographie : en couleurs 409 (chromolithographie), au crayon 404; sur gélatine 341, 417 (phototypie), 418 (autocopie); au grattoir 405 (procédé inverse); pierre 280 (écriture), 403, ., 405; à la plume 404, principe 403 (procédé direct), par reprise 405, tirage 397, sur zinc 413, .., 416.
Livre : feuilleté 40, usure 39.
Localisation : correcte 68, à droite 69, erronée 96, générale 54 (et vision indirecte), image indirecte 52, relative 62; sensations 15 *bis*, 33, 35, 37, 40.
Locke 38 (Essai sur l'Entendement).
Lois : Voy. Becquerel, Correspondance; de dispersion spectrale 122; Voy. Donders, Fechner, Galilée, Lambert, Lemoine, Listing; de moindre effort 68, Voy. Newton, périodique 189 (quelconque); physiques, physiologiques, 105; de Purkinje 119; — en raison inverse du carré de la distance (application : photomètres) 106, ..., 110; 124, 365; — simplistes 347, 348 (influence allemande).
Lommel 242 (calculs).
Longueurs : Voy. Appréciation; — comparaison 26, 28; — d'onde 116, 120 (définition, principales), 121 (petites, variation, moyenne), 122, 127 (et intensités); et coeff. d'acuité 130, 131; 132, 209, 221 (déterminées), 226, 227, 232, 240, 241 (inverses), 242, 276, 277, 330, 331, 333, 345, 348, 350, 351, 354, 366; — d'un tunnel 96.
Louchement 64, 67 (brusque), 68 (fort, volontaire), 86 (superposition d'images).
Louchette 70 (emploi).
Loucheur : Voy. Buffon; éloignant images 49, indéterminé 48 (nouveau-né); volontaire (images visuelles : dédoublement) 47, 48, 68.
Loupe : achromatique 109, 110; emploi 112, 114, 165, 231, 342, 372, 400; objet au foyer 96; 60.
Lumière : action 189 (sur rétine), 328 (variation de résistances), 337 (substances : toutes); 347, ., 349 (nature), 350; 352 (autolimitatrice), .., 355 (induction), ., 357, 399; — addition 217, 219, 230, 231; analysée 124; — blanche 17, 132, 133 (noyage), 209, 223, 226 (recomposée), 227, 233, 235, 238, 244, 256, 277, 330, 339, 340 (tamisée), 344 (éclairant par transparence), 350; — bleuie 266, Voy. Bougie, et bromure d'argent 271, cendrée 19, colorations différentes 120; colorée 32 (diversement), 227, 339, 340; complémentaires 219; complexe 209 (symbole), 345; — composition 123; connue (obtention) 225 (Newton), 226 (Maxwell), 227; donnée 242 (teinte); relative 243; — Voy. Couche sensible, déterminée 121 (complètement); diffuse 279, 297, 326, 328, 349, 350, 354; diffusée 127, 156, 210, 216 (poudres), 231, 286; dissémination 287, distribution 164 (uniforme); — effets : annulés 338; contraires 334 (oxydation, réduction), 348; visuels 123; — électrique 210, 340; émise 150, 354 (tamisée); Voy. Energie, équivalent 357 (chimique, mécanique), étalée 15 *bis*; extérieure 245, 256; faible 188, 261, 326; et f. é. m. 330, graduation 112, groupées 163, homogène 105; incidente 127, 156, 268, 269; influence 275, intense 188, Voy. Intensité, intermittente 347, interne 256, invisible 336; du jour 132, 259; lointaine 18 (image), luminosité 238; lunaire 119, 127; mélange 228; — M.M. 344 (photographie des couleurs : méth. pigmentaire), 364 (plaques intensives); — modérée 275, monochromatique 209 (intensité); monochromes 340 (non), 347 (quasi); nature 104, naturelle 228, passant librement 109; perte (par réflexion) 111, 125; phénomènes 41, et plantes 353; polarisée (rectilignement) 125 (emploi), 126 (spectrophotomètre), 228, 251; propre 256 (de l'œil), 264; Voy. Quantité, et radiations simples 120 (infinité), reçue 104, réelle 259; réfléchie 109 (totalement), 125 (incidence brewstérienne); répartition 20, rétablie 355, Voy. Rétine, riches en ultra-violet 161, rôle 349; rouge 271, 290, 297, 323; saturées 210 (peu), sens général 153 (radiation), séparation 164; simples 132, 236; du sodium 345; solaire 119, 121 (blanc objectif), 127, 162 (directe : à éviter), 195, 226, 266, 350; substitution 126; superposition 120, 229; supprimée 328, 339, 347, 355; transmise 178, 217, 231, 240, 342, 411; utilisées 266, valeur actinique 370 (actuelle), et vernis 381, verte 264, violette 132, vives 375 (obtention); 36, 37.
Luminosité : coefficients 279; Voy. Lumière, Matières colorées.
Lummer et Brodhun (photomètre) 109, 110.
Lune : clair de L. 119 (représentation; blancs bleuis), croissant 19 (lumineux), éclat 160, éclipses 19, grandeur 97 (à l'horizon), lumière 127, photométrie 160.
Lunette 19, 24 (vision), 25, 45 (verre sale), 60 (réticule et image d'un objet, 63 (de Galilée : double).
Lustres 268 (surf. lustrées, lustre stéréoscopique, effet de neige).

M

Macé de Lépinay et Nicati 131, 132.
Machine : actionnant soufflerie 385, en blanc 394, à composer 392; à diviser 25 (chariot), 26 *bis*; de rechange 392, à retiration 394; rotative 391, 394, 396; à vapeur 349 (tiroir : rôle); App. I.
Macula lutea : Voy. Tache jaune.
Maculature 370 (ch. VIII).
Mains 33,...., 38 (oscillations), 40, 41, 45, 60, 68 (levée), 94 (contact); Voy. Muscles.
Malachite 201.
Manipulations : daguerréotypie 326; diapason (période) 185 (stroboscopie).
Marbre : mat 157, poli 408.
Marge 389.
Margot 414 (adhérence).
Marie Heurtin 36.
Mariotte 16 (tache aveugle), 276 (vase).
Marouflage 208.
Mars 19; brun, jaune, rouge, violet, etc, 199, 221.
Mascart : dynamomètre de transmission 167, photomètre 114 (Pellin).
Masse et densité superficielle 104.
Massicot 198.
Masson 118 (expér.).
Matières : 31; — colorantes 315, 330 (et f. é. m.); — colorées : 148, Voy. Absorption; action et classifications 209, 210 (radiations émises : étude spectrale), . — ., 224, 247; coefficients 246, coloration 216; complémentaires 212, 240; diagrammes 246 (Maxwell), 247 (modification); équivalents 222, fondamentales 221; luminosité 212, 247; mélange 222, 248; tables 222 (Lambert), 223 (Chevreul), 224; teintes 247; usuelles 195, . — ., 208; — différente 350, division 270; grasses 338 (volatiles), 414 (adhérence), 415, 417, 418; minérales 393 (couche), noircie 350, noire 195, organiques 348 (rôle), oxydante 409, préparée 350; sensible 350 (impression : début; état actuel), 360 (loi de Becquerel), 366 (déjà impressionnée).
Matrice 392.
Mattoir 376.
Maxwell : appareil 226, 234; Voy. Bleu fond.; diagrammes (matières colorées) 246, 247 (modification); disques colorés tournants 211, 214, 215; et L. Rayleigh (expér.) 238 (résultats), 241, 246; lumière de composition connue 226 (obtention), Voy. Rouge fond.; table 238, 239; Voy. Vert fond., Young; 243.
Mécanisme préétabli 44.
Mèches : amiante 139, à blanc 1, charbonnant 139; — coton 136 (tordu : chandelles, natté : bougies), 137 (diamètre), 138 (nature); lampes : à huile 139, 141, — à pétrole 141, — Hefner 143; — plate 141; ronde 141, 143.
Médailles : images superposées 92 (même coin : métaux différents).
Meissonnier 12.
Melde 170 (expér.).
Melville 170 (expér.).
Mémoire 31, 40 (musculaire), 41 (d'une image).
Mer et horizon 12, 73.
Mercure : 19 (planète : irradiation), 325 (gravure); Voy. Cyanure, Développement.
Méridiens : Voy. Correspondance; de l'œil, de la rétine, 51; verticaux apparents 55, 56.
Métachromotypie : Voy. Décalcomanie.
Métaphysique 36, 41 (et physiciens).
Méthodes : Voy. Carreau, Draper; expérimentales 156 (diffusion); — photométriques 104 (hypoth. fond.), 105 (égalisation des éclats; variation des éclairements), 132 (clartés égales, acuités ég.); — Voy. Vierordt.
Meule d'aluminium 414.
Mica 294, 315, 329, 333, 338.
Micrographe : yeux 50 (observation au microscope).
Microscope : couvre-objets 228; peu grossissant 165, 176; et rotifère 185 (éclairement : étincelle); 50, 113, 371.
Miel 323 (et bichromates alcalins).
Milieu : nature, opaque, 348; transparent (parfaitement) 104, 348.
Mine orange 198.
Minium 120, 198, 324.
Mire lointaine 24 (traits équidistants : résolubilité).
Miroirs : articulés 71, concave 226; deux 106 (à 45°), 108, 109; images 11, 80 (déplacées), 84; métallique 240, nombre variable 114; et objet 280, 281; plan 281 (argenté sur face antérieure), 329 (mince); quatre 82 (mobiles), sphérique 171, tournant 165; 186, 226, 262, 326.
Mise : en pages 390, 392; — au point 24 (défaut et irradiation), 90, 280, 281.
Modérateur (Lampe) 139, 140.
Moi 31, 34 (continuité).
Moiré 178 (première espèce), 179 (seconde espèce), 180 (syst. de droites respectivement parallèles), 402 (évité). App. III.
Molécules 353 (agitation).
Molineux 38 (problème).
Molleton 408 (rouleaux : encrage).
Monoculaire (Vision) : 14 (fixation), 15 (acuité visuelle),.., 18 (aberration de sphéricité); irradiation 19, . — ., 25; champ visuel monoculaire 26 (topographie), . — ., 29 *ter*; 52 (maintenue), 68 (toujours), 69 (alternante); et distance 26, 96; des couleurs 267.
Monostéréoscope 85.

Monde : arabe 39 (cécité); extérieur (connaissance) 30, . — ., 43; Voy. Villey; des voyants 39 (et aveugles).
Monnaie 338 (pièce).
Montaigne : Les Sources (Villey) 41, 42.
Montre 38, 338 (cuvette et fond).
Morasse 370 (chap. VIII).
Mordant 377, 385, 396, 397.
Morse 93 (combinaisons), App. II.
Moser : expér. 336, ., 338.
Moteur électrique (de ventilateur), 164, 166, 172, 211, 212, 215, 367.
Mouches volantes 95.
Moulage : après développement dans l'eau, chaude 321 (photoglyptie, Woodburg), froide 319 (hélioplastie, Poitevin); — caractère d'imprimerie 392.
Moulinet 408.
Mousseline 179, 318.
Mouvements : accompagnant parole 36, animaux 169, continu 62; d'un homme 94 (naturels, renversés), 169; d'horlogerie 117, 139 (lampe Carcel); idée 38, involontaires 99 (insconscients : œil), lignes visuelles 61, machinal 34; des membres 34, 42 (bras), 169; notion 38, Voy. OEil, pendulaires 165 (rectangulaires), réglage 34; relatifs 60, 99 (illusions); de rotation 139 (alt.), 167 (vision), 177 (illusion); Voy. Yeux.
Mucilages 308.
Muet 34, 36.
Muller 53 (horoptère).
Multigraphie : Voy. Linotypie.
Mur : continu 40 (et rue), et disques 55, gris pâle mat 253, noirs 106, perspective 7.
Muscles : de la main 41, 60 (degré de contraction); — de l'œil 27 (action), 28 (innervation et contraction), 41, 47 (contractilité), ., 49 (contractions et vision simple), 52 (ténotomie), 64 (paralysie), 66 (forcés), 67 (innervation considérable), 68 (contraction violente), 79 (efforts : grandeur des objets).
Musées 12, 73.
Musique : gravure 380, 406; impression typograph. 380, et peinture 232, report sur pierre 406, tirage 406 (presse lithograph.).
Myopes 55, 66 (strabisme).

N

Nacre 382.
Nativiste : 31; théorie 30, 56; vision binocul. 44.
Négatif : blancs 314, 322, 339, 341; coloré 344, correct 361, définition 279, droit 302, empâté 284; inversion 282, 344, 361; et objet 361 (relation); obtention 327, 363; sur papier 292, du phototype 280, redressé 281 (obtention), renforcé 415; retourné 280, 281, 316; second 363, tramés 402, par transparence 294; trois 339, ..., 343 (rayés superposés), 402; vieux 302; 89, 301, 307, 312, 315, 316, 318, 321, 326, 333, 364, 398, ., 400.
Neige (Effet de) 268.
Nerfs : défaut d'innervation 64, excitation intense 22; optiques 16, 44 (entre-croisement); section 33.
Neutralisation : alternative 68, d'un champ de vision 50 (totale, partielle); d'une image 42, 66, 70 (habituelle : empêchée), ., 72, 79 (fusion impossible).
Newton : anneaux 178, 227; couleurs composées 248 (obtention); échelles des teintes 227, 242; loi 369 (appliquée à l'agitation); lumière de composition connue 225 (obtention).
Nicati : Voy. Macé de Lépinay.
Nicol 125, 126, 130, 227, 228, 251.
Niepce de Saint-Victor : expér. (images) 333, ., 335, 336; 381.
Nodaux (Points) : œil 14, ., 16, 26, 29, 51, 54, 57, 77.
Noir : absolu 213, apparition 272, sur blanc 371, de bougie (Voy. de fumée); Voy. Carton, Cercle; charbon de bois 196; — d'un cliché 276 (définition, mesure), 277, 279 (et éclat de l'objet), 282, 313, 358 (détermination), ., 360 (et énergie), 361 (autre définition), 363 (max., min.), ., 365 (noirci systématiquement), 366, 368, 369 (et état de la plaque), 370 (et intensité lumin.), 386; — du commerce 213; Voy. Corps, Courbe; par crayonnage 401, et creux 377, décroissement 159 (soleil : photographie), diminuant 364, Voy. Dessins; disque 174 (rayons blancs), 214; Voy. Éclairement, Ecrans; égaux 362 (pour plaque homogène), enduit 286 (indice du verre), et énergie 365; Voy. Epreuve, Fond; force 375, franc 339, et fréquence 367; — de fumée (ou de bougie) 104, 153, 196, 207, 213, 318 (pigment), 329, 330, 373, 403, 407; — industriel 213 (beau); intensité 272 (faible), 343; d'ivoire (ou d'os) 164, 196; mat 106, ménagés 393, mesure 362 (et intensité lumin. d'un faisc.), du modèle 339, moelleux 375, non rigoureux 212; de l'objet 314, 322, 339, 341; obtention 196, 248 (poudres colorées), 377 (intense), 378, 400; parfait 371, par couleur 223, pictural 116, et reflets 326, et reliefs 397; rouge, bleu, ..., violet, 195; roux 213, sur teinte plate 371, et traits 376, types 370, des vernis 409; 221, 266, 394, 395, 397, 400, 403, 404.
Noircissement : appréciable 370, cliché 291, début 350; direct 292, 297, 302, 333,

334, 370; extension 350, au pinceau 407, préalable 364 (choix), retardé 349.
Noix de galle 413, 415, 416.
Nombre : idée 31, des pas 42, et poids 40, signe 39.
Noms propres 59.
Normalité 26 (estimation).
Normands (Caractères) 388.
Notions : Voy. Espace, Etendue; — fondamentales 30 (acquisition).
Nouveau-né : connaissance 30 (intelligence, cerveau), sensations rétiniennes 44, et statue de Condillac 35; vision binoculaire (établissement), double, 48.
Nuages 61.
Nuit 19 (étoiles), 40 (trajet).
Noyage 133 (lumière blanche).

O

Obit 387.
Objectifs : achromatiques 113, 121; centre optique 280, défauts 25 (ligament noir); deux 88 (photographie stéréoscopique), 89, 91 (très écartés), 113, 124, 194; diaphragmé 112, 113, 124; écartés 63, image 231 (anneau oculaire), multiples 294; ouverture 24 (grande), 112 (variable), 124 (limitée), 287 (influence); photographique 279 (emploi), 287, 340, 342 (trois); régions 85 (images); 400.
Objets : blanc 119 (luminosité), 255 (fond noir); et bouche 42 (enfants), changeant de forme 168, coloré 255 (fond noir), et conscience 41; couleur 93, 339, 340, 343; décoration photographique 382, Voy. Déformation; détails (perception) 130, 131; déterminé 73, 74; différents (peu) 168; Voy. Dimensions, Distances; droits 43 (images sur rétine); éclairé 340, 341; et éclairements 119, éloignés 91 (images), existence 93, extérieur 76 (inexistant), fictifs 253; fixé 47, 68, 69; Voy. Formes, Fusion, Grandeur, Images; à l'infini 61, 90; jaunes 92; — lumineux : fond obscur 19, 21, 22, 24, 26 *bis*, 29 *ter*, 38 (main); 76, 190 (et sensation), 287 (très); — lumières 341, et miroir 280, monochromatique 361, en mouv. de rot, 167 (vision), noir 255 (fond blanc), Voy. Noir, nouveau 41; obscur (fond lumineux) 19, 21, 22, 24, 25 (Vénus sur Soleil), 26 *bis*; peints 106 (noir mat); perspectives 77, 78, 80, 93 (identiques); photographié 361 (et négatif : relation; — et positif), 401; primitif 75, 77; — proches (vision) 64, 66, 67, (nette); 91 (images); — Voy. Reconstitution; réels 71, 83, 87; regardé 45, 48 (à travers deux tubes noircis), 60 *bis* (et mouche), 62 (définition), 68; reproduction correcte 76, restitué 77, rouge 339, semblable 75 (obtention); et sensations 32, 93; souvenir 59, supprimé 76, tricolore 339, virtuel 63; — vus : après toucher 37; avec relief 80, 103 (renversé); binoculairement 66 (proches), dans viseur 280; double 46, 94; monoculairement 66 (éloignés), simultanément 46.
Observations : astronomiques 24 (et irradiation), cruciales 37.
Obstacles 40 (sens), 45 (et champ visuel).
Obturateur tournant 77.
Occiput 44 (niveau : chiasma).
Ocres : 199, 208, 221; Voy. Sanguine.
Oculaire : anneau 231, deux 91, divergent 63, enlevé 225; grossissement 24, 25; Voy. Œil.
Oculistes 44 (et vision binoculaire).
Odeurs 40.
Odorat 30, ., 32, 34, ., 36, 40.
Œil : Voy. Aberration, Accommodation; acuité 15, adaptation 161, et appareils 24 (effets : confusion), artificiel 18; astigmate 29 *ter*, 50, 64; Voy. Axe, azimut 29 *ter* (fixation); bon 50, 65; cessant de voir 66; de Chat 112, 276; Voy. Cornée, corps vitré 95; — et couleurs : d'une surface 132, 249; 340; — coup de poing 93, et crâne 29, Voy. Cristallin, déplacement 60; dévié 65, 69, 70; droit 26, 28, 50, 55, 68, 69, 78, ., 80, 83, 85, ., 87, 89; ébloui 119, éclairé 95; et éclats 105 (égaux), 116 (différents); éducation 41, 116; ellipsoïde 18, emmétrope 90, enveloppes 16; état 23 (et irradiation), 26 *bis*; exercice 93 (anormal, normal). extérieur 72 (antiseptique), Voy. Fatigue, fermé 95, fixant un objet 14, fonctionnement 232, foyer 95 (antérieur); gauche 26, 28, 50, 55, 68, 69, 78, ., 80, 83, 85, ., 87, 89; Voy. Gélatine, Globe; humeurs 18, hypermétrope 90, immobile 60; et intensités réelles (transposition) 119, 266; iris 95, Voy. Lettres, louchant 64, et loupe 372; et lumière 112, 232 (analyse impossible), 256 (propre); et lunette 24 (petite ouverture); mauvais 50, 64, 70; médiocre 161 (amélioré), méridien 51, mobilité 17, moyen 18; — mouvements : 60 (rapide), 99, 190; empêché 258, 259, 262; 261; — Voy. Muscles; myope 90, 342; Voy. Nodaux (Points); nu 112, 371; obturé 269, occlusion 70 (volontaire), et oculaire 24 (portion); organes de perception 232, 233, 244, 255; orientation 26, 28 (changements); oscillation 175, ouvert 95; et perspectives 77, 78, 83; et positif 364; position 29, 106, 108, ., 110, 112, 130, 131 (variable), 134, 166, ., 168, 171, 172, 186, 194, 251, 280, 281, 342, 343; près tableau 5, pression sur bord 45, et prisme 47, projections 8, pro-

priétés 370, Voy. Pupille; et radiations voisines 209, 226; remplacé par plaque photogr. 362; rotation 27, 29 *ter*, 48, 63, 68 (étendue), 69 (paradoxale), 253 (images accid. : expér.); saccades 62; sensations 42, 119, 188, 195; sensibilité 93 (modifiée), 117, 118, 127 (et éclairement), 131 (photométrique), 133, 161 (émoussée), 192 (et sensations antérieures), 276 (intervenant); sous-corrigé 18, et spectre 124 (parties voisines : effets identiques), et stéréoscope 76, et teintes lavées de blanc 249, tolérance 361; utilisé 45, 66; vision 70 (supprimée), Voy. Yeux; 1, 3, 6, 11, 12, 19, ., 21, 32, 37, 76, 96, 99, 184, 237, 267.

Œilleton 106 (fixant l'œil).

Ombres : Voy. Baguette, Bougie; centrale 18 (rectiligne); colorées 132 (voisines), 258, 259, 266; éclat 107 (le même), géométrique 287, latérales 18 (courbes), longueur (profondeur) 400; portées 87 (nuisible), 91, 145 (supprimée); sur rétine 95, par toile métallique 400.

Opéra 50 (spectateurs).

Opérations 49 (de strabisme), 89 (unique).

Oppel 99 (appareil).

Optique : géométrique 41 (Cours); Voy. Helmholtz, Illusions, Instruments; physiologique 266 (lois).

Or : 299, 338, Voy. Chlorures.

Orangé : franc 222, long. d'onde 120, spectral 237.

Oreilles : bouchées 40, fonctionnant 232, et vibration complexe 94; 329.

Orientation : Voy. Œil, Pas, Sens.

Orpiment 200.

Orseille 204.

Orthochromatiques (Plaques) 277.

Oscillateur 185 (sonnerie : trembleur).

Oscillations : Voy. Mains; — pendulaires, rectangulaires, 176.

Ouïe 30, 35, ., 37, 40, 42,

Outil détraqué 40.

Outremer 120, 202, 212 (luminosité), 217, 246.

Ouverture : d'aire variable (diaphragme) 112, 114, 130; et contact 25; insuffisante 24 (et irradiation), 25 (et ligament noir); lentille 86 (grande), 111, 112; normale 400 (diaphragme); Voy. Objectifs.

Oxalates : ferreux 282, 310, 356; ferrique 272 (retardateur), 310 (papier), 356; neutre de potassium 272, 310.

Oxydes : de chrome, cobalt, cuivre, étain, 324; d'éthyle 349; de fer 303, 324, 356; de manganèse 324, 334, 373; de méthyle 349; de plomb 334, 373; de zinc 324, 373.

P

Page : composé 391 (empreinte en creux), de composition 390 (disposition), imprimée 130 (lisibilité).

Pagination 390.

Palette usuelle 221.

Panchromatiques (Plaques) 233, 277, 340, 343, ., 345.

Papiers : actif 333 (par insolation); albuminé 297 (et salé), 316; amidonné 312, 313; autographique 397, 406; Voy. Bande, baudruche 419, Voy. Bichromates; — blanc 60, 99 (et spires d'hélice), 212 (luminosité), 214, 216 (diffuseur, réflecteur), 220 (paraissant jaune), 228, 260 (translucide), 264, 318, 333, 334, 350, 404; — et brosse 39; buvard 290, 292, 297, 322, 334; 386; calotype 292; calque 25 (éclairé), 279; de Chine 404; — au chlorure : d'argent 346, 350; d'or 349; — ciré 216, 278, 292; collage 311; colorés 17, 230; couché 298, 374, 393, 394, 409; à couche détachable 410 (par mouillage), Voy. Cube, cyanofer (cyanotype) 308, à dessin 318, éclairement 194, d'émeri 330; encollé 296, 321, 333; encré roulé 16 (et punctum cæcum), épais 321, épaisseur 40 (trieuses), fabrication App. I, au ferroprussiate (citrate et tartrate ferriques) 305, Voy. Feuille, filtre 296, fort 39, foulé 394, au gaïac 350; gélatiné 307, 316, 317; au gélatinobromure 278; glacé 395, 418; à la gomme arabique 318; grain 206 (importance), 378; grainé 401 (dessin); gris 214, 258, 260 (foncé); héliographique 309; huilé 106, 216; humide 374, 397; impressionné 316, Ingres 318, insolé 334, jaune 258, Joseph 290, Lalanne 318, laminé 374, languettes 228, à lettre 292; ligné, lisse, 401; et lumière 333; mince 114, 304, 378; mixtionnés 315, ., 317, 322, 370, 386; mouillé 39, 394, 406; noir 18, 48, 70, 89, 176; Voy. Noircissement direct, normal 397, d'office 318; ordinaire 157 (diffuseur orthotrope : transmission), 307; paraffiné 216, peinture 208; peints 98, 206, 396; perforé 409; — photographique 89; aux sels : d'argent 296, . — ., 302, de fer 303, . — ., 310; — platinotype 310, Poitevin 307, positif direct 313, pur 296, quadrillé 401, rectangulaires 38, Voy. Repérage, rouge 258; salé 292, 297, 333; à la sanguine 404; satiné 321, 409; sensibilisé 292, 333; sensible industriel 297, 304; surcharge 297, suspendu 55 (et fil); taché 108, 373; transferts 302, 316; transparent 173, 178, 230, 278, 279, 292, 315, 404; vendus préparés 298, de verre 408; vert 258, 260; 26, 107, 259, 329.

Papillotage 134; supprimé 189, 190 (production); 193; Voy. Fréquence.
Paraffine 108, 278.
Parallaxe : stéréoscopique 74; utilisation 60 (distances relatives).
Parallélisme 26 (estimation).
Parchemin 403, 406 (à la colle d'amidon), 418 (gélatiné).
Parole 36 (acquisition), 37.
Pas 40, 42 (orientation).
Pastels 207, 224 (boîte).
Paul Bert 33 (expér.).
Paupières 18 (battement).
Paysage et téléstéréoscope 82.
Peau : bœufs 311, du caméléon 220, chamois 326, chevaux 311, contact 34, Voy. Doigts, de la face 40; de l'index, du médius, 42; piquée 22, poissons 311; veau 311 (tête), 408.
Peintre : Voy. Blanc, Contraste simultané, Couleurs fondamentales; et glace 94; Voy. Palette usuelle, Peinture; — et perspective : 3 (problème fondamental), 9 (sphère), 10 (étude : intéret), 11 (truquage nécessaire), 12 (conditions à satisfaire); — Voy. Rendu Soleil Tons.
Peinture : addition des couleurs 220 (pointillisme), Voy. Aquarelle, diverses espèces 206 (aquarelle, cire, détrempe, huile), et échelle des intensités 119 (transposition), Voy. Fresque; à l'huile 206, 208 (sur bois, 211, 216 (blancs), 318 (pinceaux), 371 (dégradés), 373 (vernis); et musique 232, et perspective 10 (rôle), substratum divers 208, transparente 346 (sur verre).
Pelliculage 285.
Pellicules 278, 281, 285, 302 (transférable), 321 (image en relief), 324.
Pellin : Voy. Mascart.
Pénombre : éclairement 400, évitée 107, et flou 281, production 279.
Perception : abolie 50 (champ de vision), 94; altération 132, changements de distance 60 *bis*, erreur 93; formelle, influencée, 94; seuil 191, visuelle 44 (éducation rapide.
Périmètre 17 (champ de vision : limites).
Période courte 117, 164 (assez).
Permanganate de potassium 344, 347.
Persistance des impressions lumineuses : 77, 99, 117; 164, . — ., 169; courbes mobiles 170, . — ., 177; moiré 178, ., 180; applications photométriques 181, ., 183; stroboscopie 184, ., 186; théorie 187, . — ., 194; 252, 253 (expér.), 254 (diverses couleurs : inégalité).
Personnalité 31 (statue de Condillac : odeurs).
Perspective : 1, . — ., 13; 14, 36; — aérienne 13, 59, 97, 266, 283; alternées 77, angle droit 73; carrés 3, 5; carrelage 3, cercle 6, choix 12, chromatique 59, circonf. de cercle 6; colonnade 7, 11; conjuguées 73, . — ., 92; corps quelconque 3, correcte (inconvénients, invraisemblance) 11, courbe 6; cube 4, 75; définitions 1, et dessin 82, déterminée 73, deux 74, deux projections 8; droites 1, 77; écartement 80, échange 87, exacte 11, faussée 12, gauche 77; géométral 1, 2, 3; identique 93 (objets); images 2 (point, objet), 13 (grandeur absolue); linéaire 1, mur 7, propositions générales 1, pyramide 8; rigueur (inutile), rôle (peinture), 10; salle 10, 12 (intérieur); sphère 9, Voy. Tableau, Traité 73, truquage nécessaire 11, unique 73 (reconstitution d'un objet).
Pétrole : brut 142; essences 142, 146; gazeux 146; huiles lourdes 142, 146; Voy. Lampes, lampant 142.
Phares à éclairs 191 (vision).
Phénakisticope 168.
Phénomènes : actif 49, Voy. Adhérence, complexe 348, de diffraction 24, entoptiques 95, à hystérésis 328, de la lumière 41; périodique 178, 184 (stroboscopie), 189 (cessant de papilloter), 190 (papillotant); Voy. Purkinje; de révolution 29, 29 *bis*, 29 *ter*, 148; subjectifs 236, 252; Voy. Troxler, visuel 36.
Philosophes : et métaphysique 30, sens du mot 37, théories 41.
Philosophie : manuels 35, Voy. Professeurs.
Photoaquatinte 386.
Photochimie : lois générales 270, 277; 347, . — ., 370.
Photocollographie 341, 416.
Photocopie 304, 308, 309, 312 (brune).
Photoglyptie 321.
Photographe 274 (art), 276 (comparaison des noirs).
Photographie : à l'albumine 295, sur bois 393; — au charbon 314 (procédé), 315 (sans transfert), 316 (transfert simple), 317 (double transfert), 318; Voy. Epreuves; — du ciel 92; au collodion 289, . — ., 294; Congrès 88; en couleurs 220, 339, . — ., 346; dégradés 371, diapositives 268 (stéréoscope), double 79 (fusion impossible, neutralisation d'une image), emploi 10, de face 84; au gélatinobromure d'argent 271, . — ., 288; glaciers 59, impossibilité 11, instantanée 169 (gestes vrais), opérations générales 270, ordinaire 400, et photométrie 362, réduction 180, rochers 59, Traités 270, à travers verre jaune 233, utilisée 398.
Photographiques : décoration (Voy. Objets); Voy. Email, Halo, Irradiation, Objectif, Papier; — plaques : à l'albumine 295 : classification 277, 370; au collodion 290 291; au collodiobromure d'argent 293; états neutres 363; au gélatinobromure d'argent : Voy. Affaiblissement, antihalo

286. Voy. Développement, — étude 358, . — ., 370. — Voy. Fixage, identité (non) 368, impression 279, Voy. Irradiation, isochromatiques 277, — Voy. Orthochromatiques, Panchromatiques, — préparation 271, — Voy. Renforcement, Sensibilité, — variables 369, — voilées (utilisation) 288, 302, 320, — 276, 277, 280, 291, 311, 340, 367, 398; — procédés 270, rôle 385 (nul : vernis), Voy. Voile.

Photogravure : 282; — en creux 381 (au bitume de Judée), 382 (héliographie), ., 384 (chromozincographie), 385 (sur verre), 386 (en demi-teintes); — en relief 395; au trait 398 (bitume de Judée), 399 (albumine).

Photomètres : absolus 347 (irréalisables), Voy. Actinomètre électrique, Blondel-Broca 114, Bouguer 106, Voy. Brodhun; Bunsen, de diffusion, 108; étalonnage 110, 114; étude 348 (nécessaire), Joly et Elster 108; Voy. Lambert-Rumford, Lummer; Mascart-Pellin 114, à œil de chat 276, à papier 370, photochimiques 370 (incorrects), proprement dits 114, Ritchie 106; Voy. Rood, Simmance et Abady; usage 348, Weber 110.

Photométrie : chromatique 120, .., 123 (aspects); spectrophotométrie 123, 124, ., 126; phot. hétérochrome 118, 123, 127, . — ., 134; — et lampe Carcel 139, Voy. Lune, photographique 362, Voy. Soleil; — sources de même teinte 104 (hypothèse fondamentale), 105 (problème); photomètres basés sur l'éclairement en raison inverse du carré de la distance 106, . — ., 119; — stellaire 370.

Photophone 328.

Phototype 279 (négatif); normal 280, 281; 282.

Phototypie : Voy. Photocollographie.

Physiciens : but 270, excellent 63 (Javal), et lois simples 347, et lunette 60 (réglage), et métaphysique 41, modernes 31, radiations 368 (différences spécifiques), rôle 369, et vision binoculaire 44.

Physiologistes modernes 31.

Physique et géométrie 41 (passage).

Pianiste : lecture 62; regard 28 (doigts, musique).

Piano : corde roulée 165 (grave).

Picard 16 expér.

Picrates alcalins 320.

Pieds 35, 40.

Pierres : gravure 407; — lithographiques 403, . — ., 409, 413.

Pigeon voyageur 40.

Pigments 318.

Pile : f. é. m. 330; de glaces 228; — thermoélectrique 104, 151, 152 (utilisation : précision), ., 154, 156, 158, 276, 359, 370; — 328.

Pinceaux : doux 399, lavis 377, lumineux 76, noircissement 407; 382, 384.

Plafonds 11 (et point de vue).

Plages à comparer 106 (au contact).

Planches : en creux 319, de cuivre 372 (aciérage, gravure au burin), dévernie 377, distinctes 379, engraissée (garnie) 374, d'étain 380, de force 410, grainée 375; gravée 381 (équivalent), 398; métallique 375 (sillons et trous), 397; polie 413, retroussage 374, à trous 36; 46.

Plans : copie 304 (bleu), équation 29 *bis*; focaux principaux 80, 90, 342; de front, 1, 3, 18, 75 (transformation), 91, 98, 280; de la géométrie; descriptive 60 *bis*, Voy. Géométral; d'horizon 1, 2, 73; horizontaux 56 (sous les yeux : vision), 73; médian 29, 56, 58; méridien de l'œil 51, obscurs 18, parallèles 172 (voisins), des perspectives conjuguées 75; de projection 2 (horizontale), 9; principaux 29 *ter* (rotation), de réflexion 125; de regard 29 (primaire), 51, 55, 56 (horizontal, incliné); de symétrie 29 (tête), 84 (objet et observateur); tangent 9, verticaux 53, de visée 87.

Plaques : d'agate 338, creusée 381 (anode), décoration photographique 382, Voy. Développement; diffusantes 156, 157 (préparation); d'émail 324, Voy. Glaces, grainée 377; — métalliques : acier 321, 335 (poli); Voy. Argent, Cuivre; fer 336, fonte 399; gravée 338, 419 (finement : lime); lettres percées 45; mince, noircie, 106; Voy. Zinc; 166, 295; — Voy. Photographiques; — et poinçon d'acier 338, pour polycopie 418, sensible 89 (impression), Voy. Verre, vibrantes 176.

Plateau : dégradés 215; expér. 23, 190; irradiation 22 (théorie), .., 25; sensation persistante 164 (disques rotatifs).

Platinotypie 304, 310.

Plâtre 319 (moulage).

Pliage 389 (imperfection), 390 (après).

Plomb 324, 385 (caisse, capsule), 390, 392; Voy. Litharge, Minium, Oxydes.

Poële 40 (et aveugle).

Poignées 408 (rouleaux).

Poils 33 (touchés).

Poinçon 39 (émoussé), 376 (mattoir), 380 (gravés), 419 (pour écriture).

Pointe : de buis 405, fine 376, d'ivoire 405, sèche 372 (gravure).

Pointés : erreurs 26 *bis* (bissection, contact, prolongement).

Pointillé 400 (très fin), 409 (et chairs).

Pointillisme 220.

Points : alignés 39, bissectant 26 *bis*, brillant 185, central 61, Voy. Correspondants, deux 96 (distance angulaire et vision monoculaire), Didot 387, disparates 51; de distance 1, 2, 4; emploi 371, 372; —

de fixation 46, 52, 53 (déplacement), 58, 61; voyageant 62 (et acuité visuelle), 220; — fixé 26, 29, 54, 58, 60 *bis*, 62, 65, 117 (invariable); Fournier 387; — de fuite 1, 2, 4, ., 6, 73; principal 1, 4, 6, 12 (choix), 73; deux 2, 5; — de fusion 91, grosseur 371 (dégradés); homologues 74, 76 (quasi), 89; d'horizon 2; image 2 (perspective), 21; de l'Imprimerie nationale 387; à l'infini 6, 53 (sur l'horizon); d'intersection apparents 172 (lignes en mouv.), et ligne 387; lumineux 15 *bis* (vus séparés), 18 (éloigné, très petit), 20, 26 (extérieurs : distribution), 60 *bis* (vu); noirs 400, Voy. Nodaux, occipital 29 *bis*, opaques 371 (espacés), quelconque de l'espace 57, rapprochés 395, réguliers 401; typographie 387, 388; — de vue : variation 11, 12; dédoublé 14, différents 74 (deux), 75 (translation), ., 77; — vus simples 53, 57, 58, 62.

Poitevin : moulage 319 (après développ. dans l'eau froide); photographie des couleurs 346; procédé galvanoplastique 327; saupoudrage (perchlorure de fer) 307.

Poix 373, 399.

Polarisation chromatique 227, 240, 242.

Pôle 29 (rotation).

Police des fondeurs : App. II.

Polycopie 418.

Pompe Carcel 139.

Porcelaine : adhérence 414, biscuit 157, expér. 335 (Niepce), mince 106, tendre 335.

Portées 380 (gravure).

Portraits 11, 12.

Positif : Bayard 301; par contact 292, 343, 364; contre-type 282, correct 361, couleurs de l'objet 344; direct (obtention) 282, 344, 363, 364 (plaques intensives); immédiat 326, par inversion double 280, et objet 361, papier calotype 292; redressé (diapositif) 279, 281; par réflexion 294, retourné 319; par surexposition 288, 364; trois 339 (superposés), 340, 342 (par contact), 402 (transparents); unique 384; sur verre (diapositif) 279, 281, 288; 89, 313, 318, 320, 323, 327, 333, 381, 385, 386.

Position : antérieure 60; primaire 29, 53, 55; relative actuelle 60; secondaire 29, 29 *bis*.

Postulats et aveugles 41.

Potain 40.

Potasse 334, 414 (caustique).

Potassium : Voy. Bichromate, Bromure, Carbonate, Chlorure, Cyanure, Ferricyanure, Ferrocyanure, Iodure, Oxalate, Permanganate, Sulfate.

Potée d'étain 324.

Poudres : agglutinées 210 (mates), 211, 216; blanche 216 (SO^4Cu), 219; de charbon 336, 338, 373; — colorées 206; mélanges 210, 217, 219, 248, 344; 211, 216, 220, 307, 314, 315, 323; — composition objective 219 (variation), degré de pulvérisation (albedo) 157, Voy. Diffusion, d'émail 324, fine 399, incolore 344 (par transmission), incorporation 399, inerte 418; noire 307, 314, 315, 323; non agglutinées 207, et plaques métall. 336, résine 377; retenues 307, 323 (émail); de spath fluor 385, transparentes 411 (plus ou moins), tripoli 336, verre coloré 216 (pilé).

Poule 30.

Poulies 26 *bis*, 99 (plates), 167, 171 (égales), 172 (folles), 181, 215, 408.

Pourpres : Voy. Rouges.

Poussins 30.

Pouvoirs : absorbant 158 (atmosphère), 370 (croissant); diffusif 160 (lune), 326 (variation); — éclairants : comparaison 127, 130, 132, ., 134; égaux 130 (faisceaux), maximum 132, radiations simples 127, voûte céleste 151 (portion circulaire); — émissif 104, 149, 154 (couches : épaisseur, préparation); de résolution 15, 18, 24 (et éclairement).

Presbytie 23.

Presse : à bras 374; hydraulique 321, 322; lithographique 380, 408, 416; — passage 372 (facilité); multiple 384, 406; — à plateau 321, plusieurs 391; rotative 391, 394; en taille-douce 374, 380, 394; typographique 394, 395.

Pression : augmentant 406, bord de l'un des yeux 47 (image double), pour étoffe 396, modérée 408 (obtention); sur papier 374, 394, 396, 397 (faible).

Prévost 79.

Primaire : Voy. Direction, Plan, Position.

Principale : Voy. Distance, Droites.

Prismes : biréfringent 164, 229, 240 (spath); blanc mat 106, correcteur 65, dispersion 226 (loi), exercices 71, à faces diffusantes 134 (plâtre, porcelaine), Voy. Fresnel, inutiles 90, et nature du verre 122 (facteur de transformation); — rectangles 87; isocèles (accolés) 109, 110; — à réflexion totale 63, 84, 114, 124 (double), 183, 281; supplémentaires 114; 26, 47, 48, 83, 86, 96, 225, 226, 240, 370.

Problème : des deux tableaux 119 (Helmholtz), écriture 39, fondamental du peintre 3; des horoptères 53, 54; lecture 39, de Molineux 38, de la photométrie 105; physiologique (reconstitution stéréoscopique) 76, 77.

Professeurs : et autographie 406; de philosophie 36, 44; de la Sorbonne 41, 347.

Projections : caractéristiques 73, colorées 77, correcte 52 (image indirecte), deux 8 (emploi), fausse 69, horizontale 2 (plan), d'image triple 342, Voy. Théorie, verticale 2 (élévation).

Provostaye (de la) et Desains : diffusion 156 (appareil).

Prussiates : Voy. Ferricyanure, Ferrocyanure.
Pseudo-images 18.
Pseudoscopie 87.
Psychologues 31 (actuels), 41 (vue et espace).
Pulvérisateurs 207.
Punctum : cæcum 16, 17, 29 *ter*; proximum 18. 66 (myopes); remotum 18.
Pupilles : se contractant 161, dilatation 95 (légère) : écartement (distance) 46, 61, 63 (base), 78, 80, 83, 90, 98; milieu 65, recouvrement partiel 230; 18, 76, 96, 112, 163, 264.
Purkinje : loi 119, 213; phénomène 127, .. 129 (et loi de Fechner), 131, 132, 214, 223, 235, ., 237, 242, 243 (et théorie des couleurs), 244, 247 (négligé), 266.
Pyramide : Voy. Lambert, Perspective.

Q

Quadratrice de Dinostrate 174.
Quadrillage 6, 16 (scotomes), 18 (images), 400 (très fin). 402.
Qualités des objets 32 (et sensations), 36 (individuelles, in abstracto).
Quantité : de chaleur 156 (reçue), d'électricité 189 (transportée); — d'énergie (totale) 104, 149; 152 (appareils), 153 (reçue), 195, 209, 360 (noir); inversion 365, 366; 367 (déversées); — de lumière : diffusée 157 (totale); émise 138 (violle), — totale 149, 160, 191, — 155; incidente 155 (totale), 157; mélangées 226, reçue 156, totale 15 *bis*, transmise 125 : 21, 104, 118, 124, 158, 160.
Quartz : et aluminium 414; perpendiculaire à l'axe 227, 240, 251.
Questions : insolubles 30 (négligées); physique (début), purement mathématique, 41.

R

Racloir 375.
Radiations : absorbées 216, 266 (par atmosphère), 347; et absorption 283; action 232, 347 (moment), 350 (variation), 368 (différence spécif.); actives 347, 351, 366; addition 221, 226; Voy. Becquerel, Bouasse; calorifiques 153 (et loi de Lambert), 329; complémentaires 240, continuatrices 366; distances 121, 122; effets 330 (détermination), éliminées 276, émises 93; — énergie : transportée 121, 195; égalité 132; — fondamentales 238, 241; infra-rouge 330, 331; — intensités : comparaison 234, facteur 237, modifications 226, relatives 330 et ton de couleur 214, unités relatives 121 (détermination pratique); 209, 217, 232, 235, 236, 238, 242, 350; — jaunes 353; long. d'onde 277, 331, 333, 348 (peu différentes), 350, 351; luminosité 237, et matière sensible 350, Voy. Œil, particulières (invisibles) 332 (hypothèse inutile), point figuratif 238, et réactif 348, et réfrangibilité 350, les plus réfrangibles 131, Voy. Rétine; rouges 353, 366; et sensations 120, 232 (élémentaires); et sensibilité 116, 129, 131, 277 (plaques phot.) 331 (lame argent ioduré); simples 120 (gamme continue), 127 (pouvoirs éclairants : comparaison), 209, 221, 226, 240, 242; et sulfure d'argent 328; superposition 120, 121 (blanc), 211 (sur rétine), 226; suppression 233, 234; voisines 209 (spectre).
Raies : blanches 19; D 345, E 349; F, G, 350, 356; H 350, I 349, irradiation 19, M 350; noires 19, 108 (fine); principales 120 (long. d'onde), des spectres 121 (normal, prismatique).
Râteau 386 (sans dents), 408 (de pression).
Rats 33 (queue greffée), 95 (délire alcoolique).
Rayleigh (Lord) : Voy. Courbes, Maxwell.
Rayons : actifs 368, calorifiques (obscurs) 328, capillaires 18 (auréole), centraux 18; continuateurs 350, 368; courbes (paraissant) 174, excitateurs 350, in abstracto 41, et long. d'onde 350, marginaux 18, oxydants 350; parallèles 94, 104 (sensiblement); réducteurs 350; rouges 303, 350, 368; solaires 156, 328, 333, 334, 337, 349, 363; violets 350, 368.
Réactions : Voy. Actions photochimiques, amorcées 349 (continuant), contraire 352, Voy. Déclanchements, endothermiques 353; exothermiques 350, 352; explosive 357, sensibilité 270.
Recollage 89.
Reconstitution : d'un objet 73 (perspective unique), 74 (deux perspectives); stéréoscopique 76, 81, 86.
Redressement 49 (satisfaisant : strabisme), 89 (condition).
Réducteur 272, 306, 310 (énergique), 326, 333.
Réduction : arrêtée 352, Voy. Caoutchouc, continuant 349, Voy. Facteur.
Réflecteur parabolique 25.
Réflexe 27.
Réflexion : coloration 216, multiples 228; pertes 125, 126 (éliminées); retournement 82; supprimée 216, 411; totale 109, 124 (polarisation), 265 (indices : mesure), 286; et transmission simultanées 228; 111, 113.
Réfraction : bâton brisé 93, corrigée 70, irrégularités 95.
Regard : directions 67, errant 117 (et sensibilité), Voy. Plan.
Régions : épargnées 393 (grav. sur bois); lumineuse, obscure 20 (posit. relat.).

Réglage 34 (mouvements), 400 (facilité), 412 (très exact : déformation).
Règle 19 (paraissant échancrée).
Regnault 349 (expér.).
Relief : accentué 39, Voy. Accommodation; appréciation 59, 60 (monoculaire), 60 *bis* (binoculaire), 61 (expér. de Javal), 62 (mouv. des yeux : théorie Brücke), 63 (jumelle stéréoscopique), 76, 85; augmenté 63, 75, 82; à conserver 397, dissociation 78 (et position absolue), invariable 78; mesure quantitative 60, 60 *bis*, 62; net 85; notion qualitative 60, 60 *bis*; perception 37, 80, 92; et réalité 77, remplaçant diplopie 62; renversement 84, 87, 103; Voy. Reproduction; sensation 62, 63 (exagérée), 71 (images planes différentes), 76, 78, ., 80, 84, 85; 394, 417.
Rembrandt : genre 375 (reproduction : manière noire); Ronde de nuit 10.
Rendu 11 (satisfaisant), 266 (pictural).
Renforcement 283, 291.
Rentrées 372 (burins aigus).
Renversement : définition 280, des mouvements 94 (glace); du relief 84, 87, 103; renverser 89; 282.
Repérage : convenable 386; des couleurs 120 (simples), 396 (papiers peints); du papier 379 (sur planches), 402, 408 (sur pierre), 409 (chromolith.); possible 384.
Repères : aucun 60 *bis*, disparaissant 99, indéterminé 61, manquant 100, points 69, suivis 99.
Report : direct 398 (impossible); sur pierre 380, 406; sur zinc 397, 398.
Repoussé (Métal) 372, 380.
Représentations : analogues 94 (et locutions), en bloc 41, clair de lune 119, des corps 34; exacte 43, 60 (et intérêt d'un tableau); grandeur (vraie) 13, image 31, du monde extérieur 43, mouvement brachial 42, nature 41 (aveugles), plein soleil 119; spatiales (conquête), tactiles, 42; du temps 36.
Reproduction : en creux 371, ..., 375, . — ., 386; Voy. Dessin; et exactitude 88; Voy. Galvano, Impression, Photographie; plane 76; — Procédés 76; 270, . — ., 339 (inexacte), . — ., 361, . — ., 419; — en relief 387, . — ., 402; stéréoscopiques 76; sur zinc 393, 397.
Réseau : définition, déviation (en radians), 120; emploi 400 (similigravure), .., 402; spectre normal 121; de traits 287, 342 (bleus, rouges, verts), 343 (transparents : rouges, verts, violets).
Réserve : bitume 382; encre grasse 397, 416; obtention 376 (eau forte), 377 (aquatinte : en grains); sur pierre 404, et sable 385, sur surf. plane 395; 396.
Résine : copal 294, de gaïac 350, grains 377; en poudre 377, 399; résinate, savon, 297; 317, 376, 397.
Résistance : du bois 42, donnée 399, sensation 40, variation 328 (lumière).
Résonateurs 94, 232.
Ressort spiral 181.
Restitutions : précises, visuelles, 73 (perspective).
Retardateur 272.
Rétine : adaptation 192, et âme 43, bâtonnets 16, et caustique 95; Voy. Cônes, Correspondants (Points): — et couleurs 232 (de même aspect), 263 (assez ternes); superposition 211, 212, 240; — Voy. Courbes, courbure 18; deux 44 (vision simple), 47 (situation relative); diamètre vertical 55, Voy. Droites, éclairement 112; éléments 15 *bis* (indépendants), 22 (sensation); état 190, 193; excitabilité 256, Voy. Excitations, excitée 164, Voy. Fatigue, fonctionnement 60 *bis*, Voy. Formes, idée 43 (aucune); — images 18, 20, ., 22, 26, 28, 29 *ter*, 43 (renversées), 47, 48, 51, 53, 56, 57, 62 (différentes), 93 brisée, identiques), 96 (deux), 100 (tournant), 163, 252 (accidentelles), 266 (superposition); — immobile 28; — et lumière 189, 192; addition 228, 229, 248; 252; — Voy. Méridiens; modification (réelle) 252, 253, 258, 259 (objective); non homogénéité, 193, 257; Voy. Ombres, position 53, Voy. Punctum cæcum; et radiations 211 (spectrales : superposition), 220 (pointillisme), 221 (addition); région centrale 132, rôle 268, rotation 29 *ter*, saine 37, et sensations 343 (addition); sensibilité 54, 132, 192, ., 194; diminution 252, 255; 277: — 14, 15, 38, 46, 259.
Retournement : en décalcomanie 410, définition 89 (retourner), double 89 (habituel); évité 82, 307 (double transfert).
Révélateurs : acide pyrogallique 273, pour albumine 295; chimiques 291, 293; choix 274, pour collodion 291, ferrotypie 294; oxalate ferreux 272, 277, 278; physique 291, 293.
Revue de Métaphysique 36.
Rey : Voy. Blondel.
Ritchie 106 (photomètre).
Rognage 89.
Rood : contraste 263 (remarque), disque tournant 257 (ciel, nuages), matières colorées 247, observation de Tait 255, photométrie hétérochrome 134, théorie d'Young 246 (résultats expérimentaux).
Roscoë : Voy. Bunsen.
Roses 239, 409.
Rotation : s'accélérant 383; Voy. Axe, Carré, Dessins; illusion 177; Voy. Mouvements, Œil, Plans, Pôle; rapide 117 (cercle blanc à secteur noir), 166 (dessins); Voy. Rétine, Visuelle (Ligne); vitesse 134

(et papillotage), unique 29 (remplaçant deux rot. finies).
Roues : à couronne 171, deux 181 (même axe : décalage en marche), expér. 171, Grande R. 103 (illusion), tournant 174 (derrière palissade); App. IV.
Rouges : anglais 199; d'Angleterre 199, 326; d'aniline (fuchsine) 277, 320; carmins 204, 221 (brûlé), 248, 320; cécité 250, 251; cinabre 198, 221, 248; cochenille 204, cramoisis 239; écarlates 226, 236 (P), 239; éclatant 279, des émaux 324, extrême 242, flacon 381, Voy. Fond; fondamental 120, 221, 226, 236 (P), 237, 241; franc 223; fuchsine 246, 277, 320, 382; intense 205, indien 199, long. d'onde 120, mine orange 198, orangé 344, d'orseille 204; pourpres 204, 215, 217, 223, 239 (antique), 240, 242, 250; de Saturne 198; Van Dick, de Venise, 199; vermillon 120, 198, 212, 214 (virant au chocolat), 217, 221, 239, 246, 409; 379, 402.
Rouleaux : de bois 99 (verticaux); — encreurs 394, ., 396 (papiers peints), 397 (lisse et dur), 399, 403, 407, 408 (lithographiques), 416 (de gélatine), 417.
Roulette 372 (pointillés), 376.
Rue 40, 41.
Rumford : Voy. Lambert.

S

Sable (Jet de) 385 (grav. sur verre).
Safranine 382 (jaune).
Salle : dimensions 111, éclairement en divers points 114; perspective 10, 12 (intérieur).
Sandaraque 406.
Sanguine (ocre rouge) 339, 404, 407.
Santonate de sodium 250.
Saturation : Voy. Teinte, Ton.
Saturne 19.
Saunderson 41.
Saupoudrage 307 (au perchlorure de fer : Poitevin), 323 (procédé), 324 (émaux), 325 (grav. au mercure).
Savants 94 (étroite spécialité).
Savons 136 (saponification), 403 (de Marseille).
Scotomes 16.
Secteurs : 182, 183; noirs et blancs 190, 193; 213 (angle variable), 260 (bleu jaune; noirs).
Section principale (nicol) 125, 126.
Seebeck 349.
Sélénium 328 (conductibilité électr.).
Sels : d'argent 310, 313, 333; de chrome 312, 313, 318; de cuisine 284, 346; — de fer (ferreux, ferriques) 283, 284, 300, 303; 304, . — ., 310; 347, 350, 351, 356, 372, 377, 386, 393, 416; — marin 378, de mercure 355; d'or 310, 349; de platine 304, 310 (réduction), 382.
Sens : aiguilles (montre) 55; et causes insolites 93; disparaissant, émoussé, 40; erreur 93, exalté 40, Voy. Formes, hiérarchie 33, imparfait 94; d'un mot 36 (vieux); des obstacles, de l'orientation, 40; privation totale et pensée 30, propriétés 94 (méconnues), rôle 33, des sensations 32; suppression (opinion erronée), usage intelligent, 40; de la vue 38, 93 (exercice normal, anormal).
Sensations : et action primaire 192; actuelle 31, 59, 60, 93, 187; addition 343 (par rétine), amputés 33, antérieures 192, auditives 42, binoculaire 268; du blanc 128 (imprécision), 195, 240, 250; blanche 342, centrale 33, Voy. Cerveau; chaud 34, 35; colorées 120 (infinité : radiations simples), 221 (théorie d'Young-Maxwell), 232, 236, 245 (possibles); complexe 232 (somme symbolique), 235 (représentation); Voy. Condillac, et connaissances humaines 30; Voy. Conscience, Contact; correctes 93, 94; dents 33, discontinue 15 *bis*; par disque rotatif 164, 193 (max.); distinctes 34, douteuses 94, égales 131; — élémentaires : indépendantes 232, 243; 235 (nombre), 236, 248, 250 (cécité); — et excitation 20, 116, 129, 131, 186 (variable intermédiaire), 187 (hypothèse : facteur d'oubli), ., 189, 193, 235 (max.), 243, 244 (rapports), 256; et expérience 32; fondamentales 235, 236, 244, 245 (position), 254; fusionnées 62, Voy. Froid, et idées 35, identiques 28, instantanées 60 *bis*, et intelligence 30, intensité 127 (et intens. lumin.), interprétation 59; erreur 93, 94; jouissance 35, et ligne visuelle 26, Voy. Localisation, et mots 32; moyennes 119, 193, 257 (inégalité); musculaires 32, 34, 41, 42; normales 94; et objets 32, 93; de l'œil droit 69, passée 31, persistance 252, propres 34, du réel 60, Voy. Relief; représentation plane 235, 243; reproductions 41, de résistance 40, résultat brut 59; rétiniennes 32, 42, ., 44 (nouveau-né); réunion en groupes 94, sens 32; simultanées 32 (multiples), 34, 119; situation 33 (expér.), sourde 50, et souvenir 193, suppression d'une partie 94, sympathique 22; tactiles 32, 34, 36, 38, 41, ., 43, 93 (mal interprétées); et temps 188, 190, 192; triangle 235, 245; variation 116 (et éclats); visuelles 29 *ter*, 37, 43, 44 (éducation rapide), 93 (signes), 164 (Voy. Persistance); des yeux 45 (distinction), 79 (neutralisation partielle).
Sensibilisateurs : pour albumine 295, 399; bain 290 (collodion), 298; collodion sec 293, colorés 277 (action : loi); — papiers : à la gomme 318; mixtionnés 315, 322; salés 297; — rôle 352.

Sensibilité : accrue 297, 315; affaiblie 354 (mélange gazeux); maximum (jaune), minimum (violet), 357; Voy. Œil, papier pur 296; — plaques photograph. 277, 340; compensée 343, 344; 345, 368 (et radiations); — Voy. Radiations, Rétine.
Sensitomètre 370.
Sépia 205, 318.
Siccatif 206.
Signes : Morse 39, et objet 94; sensations visuelles 43, 93.
Silence profond 40 (et sens des obstacles).
Sillons 39, 375 (et trous), 397 (gillotage).
Similigravure (Simili) 287, 393, 400.
Simmance et Abady 134 (photométrie).
Smalt 202 (azur).
Snellen 15 (tableaux).
Sodium : Voy. Hyposulfite, Iodure, Santonate, Sulfates, Sulfite, Sulfure.
Soie 170 (cordonnet : expér.).
Sol 13 (plaine, montagne), 40 (neige), 56 (vision).
Soleil : compensateur 227, 251; — couchers 215, Voy. Disque; éclat 153, 158, 160; éclipses 19, images accidentelles distinctes 62, Voy. Lambert, levers 215; lumière envoyée 121 (blanc objectif), 127; passage de Vénus 25, du peintre 266, photométrie 158; plein S. 119 (représentation; blancs jaunis), 161 (lecture), 333, 356; réaction déclanchée 349, regardé 252.
Solides : corps 37, différents 76 (déterminés : infinité), idée 32, réel 76 (et perspectives).
Solutions colorées 217.
Sommeil 31 (état).
Sons : analyse 232, articulés 36 (reproduction), corde 176; fondamental, partiels, 94: reconnaissance 40, simple 232, simultanés 94 (violon et violoncelle), téléphone 332, tuyau clos 329; 328.
Sonnerie trembleur 185 (oscillateur).
Sorbonne 358, Voy. Professeurs.
Sources : blanche 121, 132; de chaleur 152 (découverte, recouverte); de comparaison, à comparer, 126; déplacées 105, 109, 114, 124; dimensions 104, et écran 111, Voy. Intensité, jaunes 132; — lumineuses : auxiliaire 359; différemment colorées 105, 120, 123 (spectrophotométrie, photométrie hétérochrome), 124 (deux), 126, 127, 134; éclat intrinsèque 15 *bis*, identiques 226, intense 328, intermittente 185; de même teinte 104, . — ., 119, 134; ponctuelle 18, 329; Voy. Surfaces, visibilité 15 *bis*; — permutées 108, usuelles 120.
Sourd 34, 36, 40.
Souvenir 94 (influence).
Spath : fluor 385; d'Islande 125, 251.
Spatiales (Images), 41.
Spectres : atténué 126, cannelés 234; continu 209, 210; deux 124 (superposés), magnétique 279; normal 121, 122, 130, 226, 238, 242, 277, 330, 331; — parties (régions) 124 (voisines : effets sur l'œil); intensités 131, 132; 133, 328 (violette); — prismatique 122 (emploi; loi de dispersion), 237, 242; — pur 121, 130, 225, 226, 239; photographié 277, 345, 346; 330, 349 (intense), 350 (projeté); — réel 133, 225, 226, 330, 331; visible 234, 239, 242; 340.
Spectrophotomètres 113, 124 (principe, Cornu, Govi, Vierordt), 126 (à lumière polarisée), 159.
Spectrophotométrie 123 (définition).
Spectroscopes : catadioptrique 226; Voy. Fente, Spectrophotomètres; à vision directe 113, 210; 214, 225, 234, 347.
Sphère : équation 29 *bis*, fixe 29; mobile 29, 29 *ter*; perspective 9, 11; vue 151 (disque plat).
Stadia 59.
Statue : Voy. Condillac; et équilibre statique 169.
Stéarine 108.
Stéréoscope : axe incliné 11, Claudet 85, emploi 92, étude 76 (base), exercices 71, expér. 92, images 61 (vision nette sans stéréoscope), Voy. Javal, médicaux 71, d'observation 90 (épreuves photograph.), pratique 76, à quatre miroirs 82, de réflexion 80; de réfraction 83, 90 92; théorie 76, et théorie de Brücke 62, Voy. Wheatstone.
Stéréoscopie 77, . — ., 92.
Stéréoscopiques : Voy. Déformations, Épreuves, Fusion, Images, Photographie; procédés 77; Voy. Reconstitution, Reproduction, Vision.
Stéréotypes, Stéréotypie, 391.
Strabisme : alternant 52, 64, ., 66, 68, ., 70; concomitant 64; convergent 47, 48, 52, 64, 66, ., 68, 71, 72 (sans correction); correction 65 (prismes), 67, 69 (partielle), 72; et correspondance des foveas 52, et distances relatives 60; divergent 14 (léger), 50, 64, ., 66, 72 (sans correction), 78; guérison 14, 66, 70, 72; Voy. Javal, et neutralisation du champ de vision 50; un œil utilisé 45, 94; opérations et redressement 49, 66, 69, 72; paralytique 64; périodique 64, 65, 67; permanent 64; récidivant 50, 72; traitement 71 (stéréoscope, prismes), unilatéral 64; et vision binoculaire 63, 64 (généralités), 65 (mesure), 66 (myopes), 67 (hypermétropes), 68, ..., 72.
Stroboscopie 184 (méthode : définition), 185 (procédés), 186 (expér.), App. IV.
Succession 31 (forme rudimentaire).
Sucre 323, 325 (candi).
Suie 373.
Suif : 403; Voy. Chandelles.
Sulfates : de baryum 197, 298, 318, 418; —

de cuivre 284; électrolyse 327, 381; 346; — ferreux 272. 291, 294, 303, 319, 324, 356, 416 (ammoniacal); ferrique 291, 303, 309; de potassium 330, de quinine 333; de sodium 273, 330.
Sulfite de sodium 273, 282, 283, 318 (bi).
Sulfuration 326 (daguerréotypes), 328.
Sulfure : d'argent 328, 330, 332; de sodium (électrolyse) 328, 332.
Sulzer 194 (expér.).
Superposition correcte 342.
Surfaces : colorée 210, des corps 332 (modifiables), Voy. Couleurs; diffusante 183, 268; éclairées 105 (blanches), 106, 156, 161; Voy. Éclairement, éclats 105 (égalité), encrées 395 (aire); d'émission 104, 148, 151 (et surf. réceptrice : réciprocité), 155, 159; gauche 38, grenue 409, imprimante 280 (noire), lumières émises 124 (comparaison); lumineuses 20, 148 (par elles-mêmes); lustrées 268 (chapeau, table), métalliques 382 (décoration photograph.), modification physique 338; noire 263 (applications colorées), 282; et normale 104, opaques 106; petite 118 (bords nets), 133 (blanche); plane 395 (creusée), polie 338; préparée 407, 413, 416; quasi plane (impression) 403, . — ., 419; réceptrice 104, 151 (et surf. émettrice); réfléchissantes 268, Voy. Soleil; et sources lumineuses 15 *bis* (visibilité), 105 (distances); utile 389 (texte donné : choix du caractère).
Symétrie des figures planes 280.
Système : encombrant, lent, 39; modifié 353 (équil. métastable), nerveux 33 (sensations), optique double 63, périodique 98 (dessins); rectangulaire 29 *ter* (déplacement), 55 (deux lignes); de secteurs 182 (ouverture variable).

T

Table : à couleur 408, Voy. Couleurs, de fonte 397 (chauffée).
Tableau : perspective 1, 9, 11, .., 14, 73 (convention), — ., 78, 80, 83; — regardé 266; reproduction 340 (photographie des couleurs), 375 (manière noire); et sensation du réel 60, teinte moyenne 231 (détermination), typographique (Snellen) 15; 26, 29 *bis*, 29 *ter*, 37, 38.
Tache : aveugle (Voy. Punctum cæcum), blanches (marbre noir) 335, dans champ faiblement lumineux 256, colorées 261 (dansant); à éviter 404, 406; huile 108, 373; jaune 14, 16, 26, 252 (éblouissement); paraffine, stéarine, 108.
Tact 30, 36 (exercice).
Taille-douce 371, 372 (forme : métier), 374 (encrage, essuyage, tirage), 379 (en couleur), 381, 395 (planche), 406 (tirage en lithographie); Voy. Tailles, Tirage.
Tailles : courbes, droites, 372; élargissement 395; de la grav. sur pierre 407.
Taine : Traité de l'intelligence 32, 42, 43.
Tait : Voy. Rood.
Talbot : disques colorés tournants 211, 215; papier calotype 292; — principe 117, 164 (énoncé); applications photométriques —181, ., 183; 192, 193, 211, 257.
Talc 418.
Tampon : Voy. Coton; 374, ., 376, 379 (poupée), 404.
Tangente 6 (définition), 20.
Tannin 293.
Tâtonnements visuels 62.
Teintes : bleues 250, calcul 242 (lumière de compos. donnée); complémentaires 224, 240, 251; demi 339 (monochromes), 371, 372, 386 (photograv.), 395, 400 (obtention); deux (addition) 228, ., 230; échelles de Newton 227, fondamentales 247 (simples), identiques 362 (pour œil); intensités 234 (multipliées), 243 (absolues), 251; intermédiaires 375; lavée de blanc 210, 231, 249; des lointains 266, Voy. Matières colorées, d'un mélange 218 (variation); la même 104, . — ., 119; modifiées 214, 251, 261 (par contraste), 263; neutre 409; non modifiée 226, 234; oppositions 326; pâles, peu saturées, 260 (contraste); pas la même 105, . — ., 134; pierre 404 (et dessin : effet); plate 371, 377 (noires larges : impossibles), 400 (photographiée), 409 (superposition); reproduction 345 inexacte); résultante 235, 242; saturation 133 (variation), 219 (et épaisseur), 240 (modifiée), 345; symboles 217, 234, 242; et triangle des sensations 235, 243; variations 254; vertes 250.
Téléphone 328, 332.
Téléstéréoscope 63, 82, 88, 91.
Température : de fusion 392 (alliage des caract. d'impr.); photochimique 347, 369; 94, 189.
Temps : notable 282; — de pose 274, 279, 282, 340, 347, 359 (influence); et noir 360, 363, 370 (connu); 361, 364, 367, 381 (bitume de Judée : couche épaisse); — représentation 36.
Ténotomie 52 (muscles droits internes : œil).
Terre : entraînement 99; — d'Italie, d'Ombrie, de Sienne (naturelles, brûlées), 199, 221, 279, 318; — Voy. Ligne; lumière réfléchie 19.
Test de l'acuité visuelle 15.
Tête : dans boîte 106, hauteur 40, immobile 253, points fixes 51; position 51, 100 (inclinée : erreur d'estimation).
Textes : lecture 66; typographiques 71 (incomplets), 406 (report sur pierre).

Thaumatrope 166.
Thermomètre 189 (échauffement).
Thénard : oxygène ozonisé 334 (et papier).
Théories : Voy. Brücke, Déformations, Descartes-Plateau; empiriste 30, 52, 56, 244 (notions usuelles : acquisition); Voy. Fechner, générales 414 (et phénomènes); Voy. Helmholtz, Képler; métaphysique 35; nativiste 30, 56; Voy. Persistance, philosophiques 41, picturale des trois couleurs 248; des projections 60 *bis*, 76, 78, 79, 81; des rayons excitateurs et continuateurs 350, Voy. Young-Maxwell.
Thermodynamique et : déclanchements 349; réactions dues à la lumière 350, 353.
Thermophone 329.
Tirage : du bois 393 (et dessin), en décalcomanie 410, et édition 391; en lithographie 397, 406 (d'une taille-douce), 409 (chromos); Voy. Musique, plusieurs 411 (même couleur); taille-douce 372, 374 (laminage), 379 (grand luxe : poupée, — industriel : superposition), 381, 406; en typo 395, 402 (couleurs).
Tissus : coloration 216 (laine, soie, velours).
Toile : accrochage 12, cirée 294 (noire), de lin 208 (peinture); métallique 98, 141, 145, 179, 400 (ombres); sans fin 99; 13.
Tôle : étamée 418, mince 325, vernie 294.
Tonneau rempli 40.
Tons : classés 224, Voy. Couleur, foncés 409; des peintres (chauds : rouges, — froids : bleus) 128, 244; plats 410, rabattus 223; saturation 214, 240; sur ton 263, tampons 379 (poupées), valeur 411 (diminuée).
Torsion : angle 29, 29 *ter*; du champ 18.
Toucher 32, 34, . — ., 42, 44, 45, 60 *bis*.
Toupies : métalliques 211 (massives); remplacées 164.
Tournesol 334 (papier).
Tournette 383 (emploi 399.
Train en marche 60 (paysage), 99 (relative).
Traités : Voy. Condillac, Perspective, Taine.
Traits : en amalgame 325, et astigmatisme 118; blancs (fond bleu) 304, 305; bleus (fond blanc) 304, 308; creux 384 (grav. : couleurs), croisés 46, décalqué 409, Voy. Dessins, empâtés 403; équidistants 24 (et irradiation), 130, 194, 402; espacement 371 (dégradés), 376, 400; de feu 262, fins 395, de force 409, forts (taille-douce) 374 (relief), fusion 79 (et épaisseur), gris 384 (fond rouge), gros 99 (noirs : sur large courroie), grosseur 376 (et noir), identiques 339 (trois images), intervalle 26 *bis* (bissection); parallèles 60, 130, 180, 194, 220 (au contact), 402 ; petits (et lettres) 387 (empattement, obit), en prolongement 26 *bis*; — noirs : fond blanc 304, 309, 310; (mise en relief),., 400, 415; — opaques 120 (réseau), 370 (quadrillage), 385 (par transparence), 400 (gravés ou photographiés, réseau : quadrillage), 414 (éclat métalliq.); — renforcés 402, réseau 287, sécheresse 279 (supprimée), séparation 15; transparents 398, ., 490, 415; 15 *bis*.
Trajet 40 (particularités).
Trames 400.
Transfert : double 314, 317: nécessaire 323, 324; sans 314, 315; simple 314, 316; 318.
Transformateur 328.
Translucide (Substance) 108, 130.
Transmetteur téléphonique : 328 (photophone), 329 (thermophone), 332 (photochimique).
Transmission : flexible 414; et réflexion simultanée 228.
Transparence : et radiations 348, rétablie 216, texte 280.
Transparent (Corps, Milieu) : couches minces 216; parfaitement 104, 348; poudres 216.
Travail : académique 347 (exemple), du chromiste 409, déclanchement 349, maximum (principe) 353, sur pierre 406 (direct : rare), réaction 349.
Trembleur 185 (oscillateur).
Triangle : Voy. Couleurs; équilatéral 22 (noir), 26 (angle au sommet); Voy. Sensations.
Triplopie binoculaire 69.
Tripoli 336 (calciné).
Trous : bouché 380, éclairé 287; équidistants 184, 185; formes 112, large 240, noir 213; petit 15 *bis* (visibilité), 18 (de fine aiguille), 95 (très éclairé), 280, 419 (très nombreux); rectangulaires 39, 113, 225, 251; en regard 183, série régulière 186, et sillons 375, unique 60 (dans écran), dans volet 190; 158.
Troxler 16 (phénomène).
Tscherning 18 (œil artificiel).
Tubes : bec Aüer 145, de fer-blanc 334 (expér.); lampes 139 (huile : bec), 141 (pétrole), 146 (Wells), 147 (acétylène); et lune à l'horizon 97, mobiles 87; noircis 48 (deux : vision d'un objet), 259 (intér.); de plomb 146 (soudés), 206 (couleurs à l'huile).
Tulle 179.
Typographie : attaque 395; — Voy. Caractères, Clichage, Composition, Linotype, Stéréotypie; — sur zinc 397, . — ., 402 (en couleurs).

UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 072172163